

**CHARLES MARQUES DE FARIAS**

**ALOCÇÃO ÓTIMA DE  
EQUIPAMENTOS FACTS EM  
SISTEMAS DE POTÊNCIA ATRAVÉS  
DE ALGORITMOS GENÉTICOS  
MULTIOBJETIVO**

**FLORIANÓPOLIS**

**2010**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALOCÇÃO ÓTIMA DE EQUIPAMENTOS FACTS EM  
SISTEMAS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE  
ALGORITMOS GENÉTICOS MULTIOBJETIVO**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**CHARLES MARQUES DE FARIAS**

Florianópolis, Dezembro de 2010



# **ALOCÇÃO ÓTIMA DE EQUIPAMENTOS FACTS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS MULTIOBJETIVO**

**CHARLES MARQUES DE FARIAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de concentração Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Katia Campos de Almeida, Ph.D.  
Orientador

---

Roberto de Souza Salgado, Ph.D.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Katia Campos de Almeida, Ph.D.  
Presidente

---

Flavia Maria Cavalcanti Ferreira, Dra.Eng.

---

Jacqueline Gisele Rolim, Dra.Eng.

---

Roberto de Souza Salgado, Ph.D.





*Que todos tenhamos um pouco, de criança e de loucos...*



Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **ALOCÇÃO ÓTIMA DE EQUIPAMENTOS FACTS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS MULTIOBJETIVO**

**Charles Marques de Farias**

Dezembro / 2010

Orientador: Katia Campos de Almeida, Ph.D..

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica .

Palavras-chave: FACTS, Algoritmos Genéticos Multiobjetivo, Fluxo de Potência Ótimo.

Número de Páginas: 141

Este trabalho descreve uma metodologia para resolver o problema de alocação ótima de equipamentos FACTS (Flexible AC Transmission Systems) em sistemas de potência considerando otimização multiobjetivo. Dois critérios são utilizados: o técnico e o econômico. O critério econômico é expresso através do custo do equipamento em US\$/kVAr. Para representar o critério técnico, duas diferentes funções são consideradas: mínimo desvio quadrático das tensões em relação aos valores nominais e a máxima transferência de potência entre áreas. Um Algoritmo Genético Multiobjetivo (AGMO) é desenvolvido para gerar o conjunto de soluções de Pareto do problema e assim garantir a otimização simultânea de ambos os critérios. A factibilidade das soluções é garantida através de um programa de fluxo de potência ótimo (FPO). Desta forma, as soluções operativas associadas aos locais ótimos de inserção dos equipamentos FACTS respeitam as restrições físicas e operacionais da rede elétrica e dos próprios equipamentos. Dois equipamentos são considerados: o compensador estático de reativos (SVC) e o compensador série variável (TCSC). A questão da diversidade das soluções na fronteira de Pareto é trabalhada através da técnica de fitness sharing. São analisados testes com o sistema de 30 barras do IEEE, com um sistema Inglês contendo 40 barras e com um equivalente do sistema Sul brasileiro contendo 182 barras.



Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **OPTIMAL ALLOCATION OF FACTS DEVICES USING MULTIOBJECTIVE GENETIC ALGORITHM**

**Charles Marques de Farias**

Dezembro / 2010

Advisor: Katia Campos de Almeida, Ph.D..

Area of Concentration: .

Keywords: FACTS Equipment, Multiobjective Genetic Algorithms, Optimal Power Flow.

Number of pages: 141

This work presents a methodology to solve the problem of optimally allocating FACTS equipment in electric power networks via multiobjective optimization. Two optimization criteria are adopted. The economic criterion is expressed by the equipment cost in US\$/kVar. The technical criterion is represented by two functions: (i) the sum of the square deviation of the voltage magnitudes with respect to their nominal values and (ii) the maximum power transfer among regions of the system. A Multiobjective Genetic Algorithm (MOGA) is implemented to generate a set of solutions in the Pareto optimal frontier of the problem. An optimal power flow (OPF) algorithm is used to obtain feasible solutions for the problem. By doing so, every optimal location for the FACTS equipment obtained by MOGA is associated with a operating point that respects all physical and operational constraints of the system and of FACTS equipment. Two FACTS devices are analyzed: the Static Var Compensator (SVC) and the Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC). A fitness sharing technique is used to improve the diversity of the solutions obtained by MOGA. The methodology is tested in the IEEE 30 bus system, an equivalent of the British system with 40 buses and an equivalent of the Brazilian Southern Region system with 182 buses.



## SUMÁRIO

Introdução .....	1
1.1 Considerações Iniciais .....	1
1.2 Equipamentos FACTS .....	5
1.2.1 Exemplos de Equipamentos FACTS Instalados .....	7
1.2.2 Custos de Investimento de Equipamentos dos FACTS .....	9
1.2.3 Localização dos Equipamentos dos FACTS .....	10
1.3 Revisão Bibliográfica .....	10
1.4 Motivação e Objetivos do Trabalho .....	16
1.5 Organização do Documento .....	17
Formulação do Problema .....	19
2.1 Considerações Iniciais .....	19
2.2 Modelagem do SVC e TCSC para Operação em Regime Per- manente .....	19
2.2.1 Compensador Estático de Reativos - Static Var Com- pensator(SVC) .....	19
2.2.2 Compensador Série Controlado a Tiristor - Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) .....	23
2.3 Fluxo de Potência Ótimo (FPO) .....	25
2.3.1 Variáveis de Otimização .....	27
2.3.2 Funções Objetivo .....	28
2.3.3 Restrições de Igualdade .....	28
2.3.4 Restrições de Desigualdade .....	28
2.4 Modelagem dos Equipamentos FACTS no FPO .....	29
2.4.1 Equipamento SVC .....	29
2.4.2 Equipamento TCSC .....	31

2.5	Formulação do Problema de Alocação Ótima de FACTS do Tipo SVC e TCSC	33
2.6	Conclusões	37
Otimização Multiobjetivo Inteiro Mista		39
3.1	Considerações Iniciais	39
3.2	Abordagem Multiobjetivo	39
3.2.1	Introdução	39
3.2.2	Dominância de Pareto	40
3.3	Exemplo de Abordagem Multiobjetivo	44
3.4	Métodos de otimização Multiobjetivo	50
3.4.1	Métodos a-priori	51
3.4.1.1	Método da Soma Ponderada	51
3.4.1.2	Método $\varepsilon$ -restrito	54
3.4.2	Métodos a-posteriori	55
3.4.3	Métodos Iterativos	55
3.4.4	Aplicações - Problema de Fluxo de Potência Ótimo Multiobjetivo	55
3.4.5	Adequação dos Algoritmos de Resolução	57
3.5	Problemas de Otimização Combinatória	57
3.5.1	Características Principais, Métodos de Solução e Aplicações	58
3.6	Computação Evolucionária	61
3.6.1	Fundamentos Biológicos	62
3.6.2	Descrição dos AGs	63
3.6.3	Seleção	65
3.6.4	Cruzamento	66
3.6.5	Mutação	66
3.6.6	Atualização	67

3.7	Conclusões	67
	Descrição do Algoritmo Genético Multiobjetivo (AGMO)	69
4.1	Considerações Iniciais	69
4.2	O Problema a ser Resolvido	69
4.2.1	Codificação	70
4.2.2	População Inicial	72
4.2.3	Cr�terio de Convergência	74
4.2.4	Função Aptidão Multiobjetivo	75
4.2.5	Preservação da Diversidade	77
4.2.5.1	Fitness Sharing	78
4.2.6	Operadores Genéticos	80
4.2.6.1	Seleção	80
4.2.6.2	Cruzamento e Mutação	80
4.2.7	Elitismo da População	82
4.2.8	Algoritmo de Solução	83
4.3	Conclusões	88
	Resultados Numéricos	89
5.1	Introdução	89
5.2	Considerações Iniciais	89
5.2.1	Parâmetros do AGMO	90
5.3	Resumo dos Casos Simulados	90
5.4	Casos Analisados	92
5.4.1	CASO I	92
5.4.2	CASO II	94
5.4.3	CASO III	98
5.4.4	CASO IV	100
5.4.5	CASO V	102
5.4.6	CASO VI	105

5.5	Frequência da Soluções . . . . .	107
5.6	Escolha dos Parâmetros do AGMO . . . . .	108
5.7	Conclusões . . . . .	110
Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos . . . . .		113
6.1	Conclusões . . . . .	114
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	116
Apêndice A – Solução pelo Método de Pontos Interiores . . . . .		119
Apêndice B – Dados do Sistema Sul-182 . . . . .		125



## LISTA DE FIGURAS

1	Custos para os diferentes tipos de FACTS . . . . .	9
2	Esquema do Reator Controlado a Tiristor e do Capacitor Cha- veado a Tiristor . . . . .	20
3	Esquema do SVC . . . . .	21
4	Sistema com SVC . . . . .	21
5	Sistema com SVC . . . . .	22
6	Representação do TCSC . . . . .	23
7	Potência Ativa com TCSC . . . . .	25
8	Representação do SVC no FPO . . . . .	30
9	Representação do TCSC no FPO . . . . .	32
10	Dominância de Pareto no espaço objetivo . . . . .	42
11	Diferentes fronteiras de Pareto . . . . .	43
12	Exemplo - Problema Multiobjetivo . . . . .	44
13	Região viável do exemplo multiobjetivo . . . . .	48
14	Objetivos $f_1$ e $f_2$ do exemplo . . . . .	48
15	Espaço objetivo - exemplo de 2 barras . . . . .	49
16	Interpretação gráfica do método da soma ponderada . . . . .	53
17	Mecanismo do AG . . . . .	64
18	Estrutura simplificada do Cromossomo . . . . .	71
19	Estrutura completa do cromossomo . . . . .	72
20	Rank dos indivíduos . . . . .	76
21	<i>Fitness sharing</i> dos indivíduos . . . . .	79
22	Cruzamento de ponto duplo . . . . .	81
23	Cruzamento quando considerado apenas um equipamento FACTS . . . . .	82
24	Elitismo do AG . . . . .	83
25	Algoritmo para solução do problema . . . . .	85
26	Comparação do perfil de tensões para o sistema IEEE-30 . . . . .	95

27	Sistema IEEE 30 Barras . . . . .	96
28	Fronteira de Eficiência - Caso II . . . . .	98
29	Comparação da transferência de potência - Caso II . . . . .	98
30	Fronteira de Eficiência - Caso III . . . . .	100
31	Fronteira de Eficiência - Caso IV . . . . .	103
32	Fronteira de Eficiência - Caso V . . . . .	105
33	comparação da transferência de potência - Caso VI . . . . .	107
34	Comportamento da função técnica frente variação de ( <i>nind</i> )	109
35	Comportamento da função técnica frente variação de ( <i>nger</i> )	110

## LISTA DE TABELAS

1	Equipamentos FACTS de primeira geração: TCSC . . . . .	7
2	Equipamentos FACTS de segunda geração: STATCOM . . . . .	8
3	Equipamentos FACTS de segunda geração: UPFC . . . . .	8
4	Resumo dos sistemas simulados . . . . .	89
5	Resultados para o Sistema IEEE-30 . . . . .	93
6	Soluções não-dominadas para o Sistema IEEE-30 . . . . .	94
7	Soluções não-dominadas para o Sistema IEEE-30 . . . . .	97
8	Resultados para o Sistema ENG-40 . . . . .	99
9	Soluções não-dominadas para o Caso IV . . . . .	101
10	Tensões nas Barras da região de Curitiba com e sem a presença do SVC . . . . .	101
11	Tensões nas Barras da região de Curitiba com e sem a presença do SVC . . . . .	102
12	Soluções não-dominadas para o Caso V . . . . .	103
13	Tensões nas Barras da região de Gravataí com e sem a presença do SVC . . . . .	104
14	Tensões nas Barras da região de Gravataí com e sem a presença do SVC na barra de Trombudo-138 kV . . . . .	104
15	Soluções não-dominadas para o Sistema Sul-182 . . . . .	105
16	Soluções não-dominadas para o Sistema Sul-182 conside- rando rede completa e o critério de maximização da trans- ferência de potência . . . . .	106
17	Frequência das soluções não-dominadas . . . . .	107
18	Dados de barra do Sistema Sul-182 . . . . .	125
19	Dados de linha do Sistema Sul-182 . . . . .	129



## LISTA DE SÍMBOLOS

$nb$	Número de barras do sistema
$nl$	Número de linhas do sistema
$P_{kl}$	Fluxo de potência ativa entre as barras $k$ e $l$
$x_{kl}$	Reatância indutiva entre as barras $k$ e $l$
$x_{kl}^{min}$	Reatância mínima entre as barras $k$ e $l$
$x_{kl}^{max}$	Reatância máxima entre as barras $k$ e $l$
$x_{kl}^0$	Reatância da linha contendo equipamento TCSC
$x_L^{lim}$	Reatância máxima indutiva do equipamento TCSC
$x_C^{lim}$	Reatância máxima capacitiva do equipamento TCSC
$X_{TCSC}$	Reatância do equipamento TCSC
$s$	Taxa de compensação do equipamento TCSC
$F$	Função objetivo do problema
$P_{gk}$	Potência ativa gerada na barra $k$
$P_{dk}$	Carga ativa na barra $k$
$Q_{gk}$	Potência reativa gerada na barra $k$
$Q_{dk}$	Carga reativa na barra $k$
$V_k$	Magnitude de tensão na barra $k$
$V_k^{min}$	Limite mínimo da magnitude de tensão na barra $k$
$V_k^{max}$	Limite máximo da magnitude de tensão na barra $k$

$a_{kl}$	Tap do transformador variável entre as barras $k$ e $l$
$a_{kl}^{min}$	Limite mínimo do tap do transformador variável entre as barras $k$ e $l$
$a_{kl}^{max}$	Limite máximo do tap do transformador variável entre as barras $k$ e $l$
$fl_{kl}$	Fluxo de potência ativa entre as barras $k$ e $l$
$fl_{kl}^{min}$	Limite mínimo do fluxo de potência ativa entre as barras $k$ e $l$
$fl_{kl}^{max}$	Limite máximo do fluxo de potência ativa entre as barras $k$ e $l$
$\phi_{kl}$	Ângulo de defasagem do defasador entre as barras $k$ e $l$
$\phi_{kl}^{min}$	Limite mínimo do ângulo de defasagem do defasador entre as barras $k$ e $l$
$\phi_{kl}^{max}$	Limite máximo do ângulo de defasagem do defasador entre as barras $k$ e $l$
$b_k$	Susceptância do equipamento SVC
$b_k^{min}$	Limite mínimo da susceptância do equipamento SVC
$b_k^{max}$	Limite máximo da susceptância do equipamento SVC
$Q_{SVC_k}$	Potência reativa fornecida pelo equipamento SVC conectado à barra $k$
$Q_{SVC_k}^{min}$	Potência reativa mínima fornecida pelo equipamento SVC conectado à barra $k$
$Q_{SVC_k}^{max}$	Potência reativa máxima fornecida pelo equipamento SVC conectado à barra $k$

$V_k^{esp}$	Magnitude de tensão especificada na barra $k$
$\beta$	Inclinação da reta que representa a faixa de controle linear do equipamento SVC
$C_{sh}$	Custo associado ao equipamento SVC
$C_s$	Custo associado ao equipamento TCSC
$F_t$	Função técnica
$F_e$	Função econômica
$\mathbf{u}$	Vetor representando as variáveis de controle dos equipamentos FACTS
$\mathbf{t}$	Vetor representando as variáveis do sistema
$\mathbf{y}$	Vetor representando a posição dos equipamentos FACRS
$r_i^t$	<i>rank</i> do indivíduo $i$ na geração $t$
$p_i^t$	número de soluções que dominam a solução $i$ na geração $t$
$d_{ij}$	distância Euclidiana entre os indivíduos $i$ e $j$
$m_i$	Fator de degradação
$\sigma_{share}$	Parâmetro de compartilhamento





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

O aumento constante da demanda por energia elétrica, resultante de índices de crescimento de países em desenvolvimento como o Brasil, acompanhado pelo crescente número de restrições para construção de novos empreendimentos, obriga a operação dos sistemas de potência muito próximo de seus limites. No entanto, é extremamente recomendável que, mesmo operando próximo de seu limite, o sistema de potência proporcione energia com qualidade e confiabilidade. Esse requisito adicional, antes da reestruturação do setor muitas vezes relaxado, resulta em uma alteração dos conceitos tradicionais do setor elétrico. Com isso, nas últimas décadas, é evidente o crescimento em pesquisas destinadas à elaboração de modelos de planejamento da transmissão (FLORES, 2006).

Ao se analisar a relação entre crescimento econômico e investimentos no setor eletro-energético percebe-se que são diretamente proporcionais, uma vez que o aumento constante da demanda reflete no aumento da capacidade instalada das unidades geradoras. O Banco Central, por meio de seu relatório de mercado em parceria com instituições financeiras (BRASIL, 2010), projeta um crescimento econômico para o ano de 2010 acima dos 5%. Grande parte deste crescimento é alavancado pela produção industrial cuja expectativa de crescimento, também de acordo com o documento, é na faixa de 8%. Baseados nesses dados, a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) estima para o ano de 2010 um consumo total de eletricidade de 455,2 mil gigawatts-hora (GWh), o que equivale a um crescimento de 9,4% a em relação ao ano de 2009 (EPE, 2010). Estima-se que entre 2010 e 2018 o consumo total de eletricidade no Brasil cresça a uma taxa média de 5,2% a.a., chegando a 681,7 mil GWh em 2018.

Idealmente, deve-se ampliar a capacidade instalada das unidades ge-

radoras de acordo com o crescimento da carga, pois assim tanto o risco de falta de suprimento quanto o custo efetivo do investimento é, na teoria, minimizado. No entanto, a crescente preocupação com o meio ambiente, a falta de recursos ou mesmo questões políticas, podem postergar a construção de novas unidades geradoras ou de novas linhas de transmissão. Tais problemas têm tornado a operação e o planejamento dos sistemas elétricos uma tarefa cada vez mais complexa. Portanto, utilizar de forma mais eficiente possível as instalações já disponíveis é de fundamental importância e deve ser objetivo de qualquer planejamento da expansão.

No Brasil, a maior parte das unidades geradores estão distantes dos grandes centros de carga e faz-se necessário um sistema de transmissão robusto e confiável para transportar a energia para os grandes centros urbanos. Assim, há a constante necessidade de adequação de toda a malha de transmissão frente os constantes aumentos de demanda. Tal adequação é uma das responsabilidades dos engenheiros que fazem o planejamento da expansão do sistema.

O planejamento da expansão de sistemas de potência tem o objetivo de encontrar o plano ótimo de inserção de novos geradores e circuitos de transmissão e distribuição, de forma a atender simultaneamente a previsão de aumento da demanda e o fornecimento contínuo de energia. Em uma etapa inicial, o planejamento da transmissão considera apenas a demanda de potência ativa e nessa etapa é usada a representação CC da rede elétrica. Estando definido o plano ótimo de expansão considerando os requisitos de potência ativa, utiliza-se a modelagem CA da rede elétrica para o planejamento de reativos. Tal problema tem importância considerável, pois seja na operação em regime permanente seja na ocorrência de contingências, o fornecimento de potência reativa tem papel fundamental para obter um perfil de tensão preestabelecido e atender restrições de segurança, operação e qualidade do serviço prestado.

Entre os diversos equipamentos utilizados no sistema de potência, al-

guns tem a capacidade de fornecer reativos para o sistema, sendo fundamentais no suporte de tensão. As fontes de potência reativa mais básicas são os capacitores e reatores. Eles são inseridos no sistema com o intuito de controlar as tensões em pontos específicos. Podem ou não ser manobráveis e sua operação se restringe ao regime permanente. Além dos capacitores e reatores, existem os compensadores síncronos que atuam tanto no regime permanente quanto no período transitório. São máquinas girantes que somente consomem potência ativa de suas perdas internas e são fundamentais para o suporte de tensão na ocorrência de contingências, embora tenham a possibilidade de atuarem também no regime permanente. Há também os transformadores com tap variável que são frequentemente utilizados no controle de tensão no sistema. Por não apresentarem custo de utilização são a primeira opção para controle de tensão no sistema. Além desses, os geradores em operação também são fontes de potência reativa para o sistema. Em diversas situações, há unidades operando como compensadores, estando em atividade somente para fornecer suporte de reativos.

Atualmente, a política de uso dos recursos para controle de tensão é definida nos critérios preconizados no Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema (ONS). De acordo com (ONS, 2003), considerando a ordem de prioridade, os recursos para controle de tensão são utilizados da seguinte forma:

1. Comutação de taps variáveis dos transformadores;
2. Chaveamento de capacitores e reatores;
3. Redespacho de geração;
4. Despacho de geradores como compensadores.

O despacho de geradores como compensadores de reativos é, atualmente, considerada um serviço ancilar e, portanto, é evitada pelo Operador,

que busca a modicidade tarifária (LIMA et al., 2009). Em alguns casos, o desligamento de linhas de transmissão, principalmente na ocorrência de níveis de carga reduzidos, é uma opção para reduzir a tensão de alguns pontos específicos do sistema.

O desenvolvimento da eletrônica de potência nas últimas décadas possibilitou a criação de novos equipamentos para o sistema, aumentando os recursos usados no controle de tensão. Esses equipamentos, conhecidos com o nome genérico de equipamentos FACTS (Flexible AC Transmission Systems), foram criados com o objetivo de tornar os sistema de potência mais flexíveis do ponto de vista de controle.

Equipamentos FACTS além de contribuírem para o problema do suporte de reativos, anteriormente discutido, introduzem alguns controles antes indisponíveis. FACTS podem, por exemplo, controlar o fluxos paralelos quando os chamados "corredores" de transmissão são utilizados (ALMEIDA; SILVA, 2006). São situações nas quais tem-se dois circuitos operando em paralelo porém com capacidades operativas diferentes. Em alguns casos, equipamentos FACTS podem ser instalados para redirecionar tais fluxos e aliviar sobrecargas. Ainda no sentido de controle de fluxo, equipamentos FACTS introduzem a possibilidade de controlar o fluxo em uma linha de transmissão e, portanto, operá-la próximo de sua capacidade operativa em regime permanente.

Outra grande virtude dos equipamentos FACTS é sua atuação para a manutenção da estabilidade dinâmica dos sistemas de potência. Esses equipamentos podem ser introduzidos em um sistema para melhorar seu comportamento transitório e amortecer oscilações eletromecânicas na ocorrência de contingências.

Equipamentos FACTS podem ser considerados entre as opções para a expansão de um sistema. Tal como ocorre no planejamento de reativos, os estudos necessários para se determinar os locais de inserção dos equipamentos

FACTS devem ser realizados utilizando-se o modelo CA da rede elétrica. A análise dinâmica é também necessária.

## 1.2 Equipamentos FACTS

O desenvolvimento e utilização da tecnologia FACTS só foi possível com os avanços da eletrônica de potência e da tecnologia de chaveamentos. Os equipamentos começaram a ser projetados a partir do final da década de 60. O termo FACTS só passou a existir a partir de 1988, quando Hingorani publicou o artigo com o título *Power Eletronics in Electric Utilies: Role of Power Eletronics in Future Power Systems* (HINGORANI, 1988). À medida que são desenvolvidos dispositivos eletrônicos aplicáveis a potências elevadas e com altas frequências de chaveamento, novos equipamentos FACTS têm sido propostos. O uso desses equipamentos no sistema elétrico de potência tem aumentado continuamente nos últimos 20 anos (ALMEIDA; SILVA, 2006).

Grande parte dos equipamentos FACTS está baseada na utilização de transistores e tiristores convencionais de potência (ALMEIDA; SILVA, 2006). Um desses dispositivos é o IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), que é capaz de suportar altas tensões e correntes e possui uma relativamente pequena queda de tensão na condução. Esse dispositivo é utilizado em equipamentos com tensão nominal de 3 a 5 kV. Um outro tipo de transistor é o MOSFET (MOS Field Effect Transistor) que é indicado para uso em baixas tensões, mas possui alta capacidade de condução e bloqueio.

Dependendo da atuação do equipamento, pode-se estabelecer três categorias diferentes (ALMEIDA; SILVA, 2006)

- Controladores Série
- Controladores em Derivação (Shunt)
- Controladores Série-Shunt

Além disso, de acordo com tecnologia empregada, os equipamentos FACTS podem ser divididos em dois grupos:

1. Equipamentos FACTS de primeira geração, baseados em reatores chaveados a tiristores;
2. Equipamentos FACTS de segunda geração, baseados nos conversores CC-CA (VSC - Voltage Source Converter), que produzem tensões trifásicas na frequência fundamental com amplitude e ângulo controláveis.

Os equipamentos FACTS de primeira geração são muito utilizados em sistemas de potência. Entre os principais FACTS de primeira geração estão o Compensador Estático de Reativos (Static Var Compensator - SVC) que funciona como um condensador síncrono, porém sem possuir partes móveis, e o Capacitor Série Controlado a Tiristor (Thyristor Controlled Series Capacitor - TCSC), capaz de simular artificialmente uma reatância em série com a reatância da linha e assim controlar o fluxo de potência ativa.

Entre os equipamentos FACTS de segunda geração, atualmente destacam-se o Compensador Síncrono Estático (Static Synchronous Compensator - STATCOM), cuja atuação é muito semelhante ao SVC, porém com uma série de vantagens; o Compensador Série Síncrono Estático (Static Synchronous Series Compensator - SSSC), que introduz uma tensão em série com a linha de transmissão e o UPFC (Unified Power Flow Controller) que combina as qualidades do SVC e do TCSC.

Podem ser listados como principais benefícios da instalação de equipamentos FACTS (ALMEIDA; SILVA, 2006):

- O controle de fluxo de potência nas linhas de transmissão, até então inexistente;

- A possibilidade de operar as linhas de transmissão próximas de suas capacidades máximas;
- Um bom controle do fluxo entre áreas, o que reduz significativamente a reserva operante do sistema;
- Rápido suporte de reativos, podendo contribuir para a redução de oscilações eletromecânicas no sistema.

### 1.2.1 Exemplos de Equipamentos FACTS Instalados

Equipamentos FACTS de primeira geração tem sido utilizados em diversos países. Estimativas indicam que o número de FACTS do tipo SVC chegue a 800 (ALMEIDA; SILVA, 2006). A Tabela 1 apresenta as principais características dos 7 equipamentos FACTS do tipo TCSC em operação.

Tabela 1: Equipamentos FACTS de primeira geração: TCSC

Número	País	Local	Tensão	Objetivos
1	Brasil	Serra da Mesa Imperatriz	500	Amortecimento de oscilações eletromecânicas
2	China	Subestação Pingguo	500	Amortecimento de oscilações eletromecânicas Aumento da margem de estabilidade transitória Aumento da potência transmitida
3	China	Subestação Chengxian	220	Amortecimento de oscilações eletromecânicas Aumento da margem de estabilidade transitória Aumento da potência transmitida
4	EUA	Subestação Kayenta	500	Aumento da potência transmitida
5	EUA	Subestação Slatt	500	Controle de Fluxo e maior carregamento
6	Índia	Subestação Raipur	500	Amortecimento de oscilações eletromecânicas
7	Suécia	Subestação Stode	500	Amortecimento de ressonância subsíncrona

Considerando os equipamentos FACTS de segunda geração, as

aplicações mais relevantes do STATCOM são apresentadas na Tabela 2. No caso dos UPFC, apenas dois estão atualmente em operação, sendo um na Coréia do Sul e outro nos Estados Unidos. Suas características são apresentadas na Tabela 3.

Considerando a utilização do equipamento TCSC, tem-se no Brasil a aplicação na interconexão dos sistemas Norte e Sudeste, frequentemente referenciado como tronco Norte-Sul, onde quatro equipamentos TCSC permitem a transmissão de grandes blocos de potência. Instalado em 1999, o equipamento opera na linha Serra da Mesa - Imperatriz com o intuito de amortecer oscilações eletromecânicas (MARTINS, 1999; GAMA, 1999). Podendo compensar até 15% da reatância da linha, o equipamento possui 107 Mvar de capacidade nominal e opera em tensão de 500 kV.

Tabela 2: Equipamentos FACTS de segunda geração: STATCOM

Número	País	Local	Tensão	Objetivos
1	Dinamarca	Parque eólico Rejsby Hede	60	Compensação reativa dinâmica para geração eólica
2	USA	Subestação Sullivan	161	Compensação reativa Dinâmica
3	USA	Subestação Essex	115	Compensação reativa Dinâmica
4	USA	Subestação Talega	138	Compensação reativa Dinâmica
5	USA	Subestação Holly	138	Compensação reativa Dinâmica
6	USA	Subestação Glenbrook	115	Compensação reativa Dinâmica
7	Inglaterra	Subestação East Clayton	400	Compensação reativa Dinâmica

No Brasil em 2004 um equipamento do tipo SVC foi instalado na subestação Bom Jesus da Lapa II, na Bahia. A subestação faz parte do sistema Interligação SE-NE (Sudeste - Nordeste), que compreende ainda as subestações Serra da Mesa, Rio das Éguas, Ibicoara e Sapeçu.

Outro exemplo de aplicação da tecnologia, é a instalação na



Tabela 3: Equipamentos FACTS de segunda geração: UPFC

Número	País	Local	Tensão	Objetivos
1	Coreia do Sul	Parque eólico Hangjin	60	Suporte de tensão e Evitar sobrecargas
2	USA	Subestação Inez	161	Suporte de tensão e Controle de fluxo

subestação São Luís II de um SVC cuja capacidade nominal é de 150Mvar (-100 a 150Mvar), operando em 230kV. A entrada em operação do compensador estático contribui para o controle de tensão da área Maranhão em regime normal de operação e também para atender a demanda de potência reativa do sistema quando de contingências de linhas de transmissão. Além disso, destacam-se os SVCs instalados nas subestações Fortaleza, Milagres, Funil e Campina Grande, entre outros.

### 1.2.2 Custos de Investimento de Equipamentos dos FACTS

Os equipamentos FACTS são feitos por encomenda e seus custos variam muito com o tipo de instalação. Os custos apresentados na Figura 1 foram retirados da referência (GERBEX; CHERKAoui; GERMOND, 2001). Eles representam o custo em  $US\$/kVar$  para os diferentes tipos de equipamentos FACTS. Na esquerda pode-se verificar a diferença em custo do SVC e do STATCOM e na direita são comparados os custos da compensação série fixa (FSC), do TCSC e do UPFC.

### 1.2.3 Localização dos Equipamentos dos FACTS

O desempenho de um equipamento FACTS depende de sua localização no sistema. Se, por exemplo, um equipamento do tipo SVC é inserido no sistema, sua localização deve ser tal que controle a tensão no barramento mais crítico e também melhore as tensões em barramentos vizinhos. Por outro lado, se um equipamento TCSC, por exemplo, é inserido

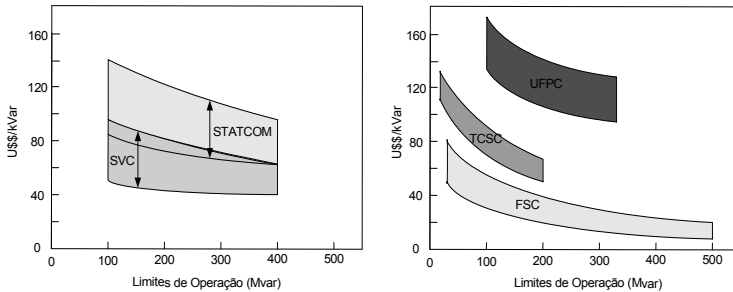


Figura 1: Custos para os diferentes tipos de FACTS

no sistema para fazer o controle de fluxo entre diferentes áreas de um sistema, sua localização pode afetar consideravelmente o intercâmbio obtido.

Porém, o problema de localizar um equipamento FACTS no sistema de potência não é de fácil solução por ser combinatório. Sua resolução exige normalmente elevado tempo computacional. Diferentes métodos tem sido empregados na solução desse problema, tal como será visto na revisão bibliográfica a seguir.

### 1.3 Revisão Bibliográfica

Nesta seção será realizado um apanhado das publicações que mais influenciaram o desenvolvimento do presente trabalho. Primeiramente, serão apresentados os artigos referentes a modelagem dos equipamentos FACTS, entre eles os trabalhos de Hingorani. Na sequência, será abordado a aplicação de tais equipamentos nos sistemas de potência. Serão apresentados artigos que mostram o potencial de utilização dos equipamentos FACTS nos sistemas de potência. Por fim, serão discutidos artigos que apresentem metodologias para a alocação ótima de FACTS nos sistemas, entre eles métodos heurísticos. Com isso, pretende-se introduzir o estado da arte no que diz respeito a equipamentos FACTS.

N. Hingorani é considerado o precursor da tecnologia FACTS. Em (HINGORANI, 1988) o autor apresenta os benefícios dos controladores baseados a tiristores em sistemas de potência reais. Ele faz uma análise completa dos diversos equipamentos FACTS, entre eles o SVC, TCSC, STATCOM e TCPST (Tyristor Controlled Phase Angle Regulator). O trabalho apresenta as principais características de cada equipamento, bem como suas principais indicações de uso. Além disso, faz uma análise detalhada de como obter certos tipos de ganho em um sistema de potência utilizando os diferentes equipamentos FACTS. Mostra também que os equipamentos FACTS são mais eficientes que as soluções tradicionais como transformadores defasadores, capacitores e reatores chaveados mecanicamente, pois estes são lentos e possuem problemas de ressonância. Atualmente, é referência consolidada em qualquer trabalho acadêmico na área de FACTS.

A partir do trabalho de Hingorani, vários estudos foram feitos sobre o impacto dos equipamentos FACTS nos sistemas. Um dos primeiros (TARANTO; PINTO; PEREIRA, 1992) analisa o impacto de compensadores série utilizando-se a modelagem CC da rede elétrica. Posteriormente, Galiana e colaboradores (GALIANA et al., 1996), publicaram um estudo que avalia o impacto desses equipamentos na operação com base no conceito de "Regiões de Segurança". Os estudos foram feitos utilizando-se um programa computacional de fluxo de potência ótimo e foram analisados os equipamentos FACTS do tipo TCPST, TCSC e UPFC. Em 2004, Nassif e colaboradores (NASSIF; COSTA; SILVA, 2004) investigaram os efeitos de dois dispositivos FACTS, o SVC (Static VAR Compensator) e o STATCOM (Static Synchronous Compensator), na estabilidade angular frente a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência a partir da análise dos autovalores do modelo linearizado do sistema.

O conceito de Regiões de Segurança se mostrou importante na análise do potencial dos equipamentos FACTS. Utilizando tal conceito Machado

e colaboradores (MACHADO, 2003), estudaram a aplicação dos dispositivos FACTS no sistema de transmissão de 525kV da ELETROSUL, com o objetivo de maximizar a transferência de potência ativa da Região Sul para a Região Sudeste do Brasil. Soluções contendo equipamentos FACTS foram comparadas com compensações série fixas e com reforços e/ou ampliações de circuitos. Recentemente, o mesmo conceito foi empregado no estudo do potencial dos equipamentos FACTS para aumentar a capacidade de transmissão do Sistema Interligado Nacional (ALMEIDA et al., 2009).

Em meados do ano 2000, Mutale e colaboradores publicaram um trabalho interessante sobre o quão importante é o uso dos equipamentos FACTS (MUTALE; STRBAC, 2000). O objetivo do trabalho é verificar a competitividade dos equipamentos FACTS versus incrementos no sistema de transmissão. Embora somente os equipamentos que controlam fluxo de potência ativa tenham sido modelados, ele relaciona o uso de tal tecnologia versus o reforços nas linhas de transmissão já existentes. Através de uma análise dos custos envolvidos no processo, o trabalho indica a melhor opção para a ampliação da capacidade de um sistema de potência. Baseado nos resultados apresentados, a ampliação do sistema, quando bem projetada, apresenta resultados economicamente mais atrativos do que o uso de equipamentos FACTS. No entanto, o trabalho não verifica o impacto dos equipamentos FACTS no perfil de tensão, pois um fluxo de carga DC é utilizado para obtenção do ponto de operação. Além disso, não é verificado o impacto de tais equipamentos no comportamento dinâmico do sistema.

À medida que novos equipamentos FACTS são propostos, pesquisadores vêm trabalhando na suas representações nos modelos matemáticos utilizados na análise da operação. Em 2001, Zhang e Handschin modelaram o GUPFC (Generalized Unified Power Flow Controller) no fluxo de potência ótimo (ZHANG X. P. HANDSCHIN, 2001). Os resultados apresentados comprovaram o excelente desempenho do equipamento. Em 2003, Xiao-Ping Zhang

introduziu a modelagem do SSSC no problema do fluxo de carga (ZHANG, 2003). Os limites físicos do equipamento são considerados. Em 2006 Zhang e colaboradores propuseram uma modelagem detalhada do STATCOM para problema de fluxo de carga com o intuito de estudar os efeitos do equipamento quando aplicado ao problema de instabilidade de tensão (ZHANG et al., 2006). Por fim, em 2008, representações detalhadas do STATCOM, SSSC e UPFC foram inseridas no problema do fluxo de potência ótimo (DUPIN; ALMEIDA, 2008)

Vários pesquisadores analisaram o problema de alocação ótima de equipamentos FACTS na rede elétrica. Diferentes métodos foram propostos para resolver este problema combinatório, muitos deles baseados no uso de meta heurísticas. A seguir são descritos alguns trabalhos.

Em (PATERNI et al., 1999) é proposto a alocação de transformadores defasadores utilizando algoritmos genéticos em conjunto com um modelo linear de FPO. A função objetivo do problema é uma combinação do custo de geração, do custo de investimento dos FACTS. A metodologia foi aplicada ao sistema francês e os resultados indicam a minimização do custo anual de operação frente a utilização de equipamentos FACTS, uma vez que com a inserção dos equipamentos, gerações economicamente mais atraentes puderam ser despachadas.

Em 2001, Gerbex e colaboradores formulam um problema para a maximização do carregamento em sistema de potência através de um algoritmo genético (GERBEX; CHERKAOUI; GERMOND, 2001). A margem de carregamento é utilizada como uma medida de desempenho do sistema. Para a obtenção do ponto de operação, é utilizado um fluxo de carga convencional em coordenadas polares. Quatro tipos diferentes de equipamentos FACTS são modelados: o TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), TCPST (Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer), TCVR (Thyristor-Controlled Voltage Regulator) e SVC (Static Var Compensator).

As simulações são realizadas utilizando o sistemas teste IEEE 118 barras e a função aptidão (*fitness*) é concebida de forma a penalizar as configurações dos FACTS para linhas sobrecarregadas e sobretensão ou subtensão nas barras. Através dos resultados comprova-se que a utilização de diferentes tipos de equipamentos FACTS simultaneamente aumenta consideravelmente o ganho na margem de carregamento. Porém, é identificado um limite máximo, a partir do qual a inserção dos equipamentos passa a não ter influência.

O trabalho de Lima e colaboradores resolve o problema de alocação do equipamento FACTS tipo TCPST através de programação linear inteiro-mista (LIMA et al., 2003). A grande diferença para as outras abordagens, além do fato de usar programação inteiro mista, é o fato de a metodologia ter como resultado o número de equipamentos que maximiza a margem de carregamento do sistema. Porém, na modelagem é considerado um fluxo de potência DC e, portanto, a influência do equipamento FACTS no perfil de tensões, por exemplo, não pode ser avaliada. Contudo, a metodologia é aplicada a um sistema real de 904 barras e os resultados apresentados mostram que o tempo computacional é a grande vantagem do método. Comparações são realizadas com metodologias similares e o resultados são mais expressivos.

Em um artigo publicado em 2004, Cai e colaboradores utilizam também algoritmos genéticos para a alocação ótima dos mesmos tipos de equipamentos FACTS, porém considerando o UPFC (Unified Power Flow Controller) e o TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer) (CAI; ERLICH; STAMTSIS, 2004). Entretanto, ele difere de (GERBEX; CHERKAOUI; GERMOND, 2001), pois, embora não seja um problema de otimização multiobjetivo, ainda sim apresenta os custos envolvidos no processo. Para obtenção dos resultados é utilizado um sistema teste de 10 barras. As simulações validam a capacidade da metodologia em minimizar os custos do sistema, que incluem, além dos custos envolvidos com os equipamentos FACTS, as ofertas dos produtores independentes. Como características

do Algoritmo Genético, utiliza o mecanismo da roleta para a seleção dos indivíduos e múltiplos pontos de cruzamentos. Além disso, faz uma análise dos congestionamentos no sistema, bem como avalia a influência no número de equipamentos FACTS no máximo carregamento do sistema.

No ano de 2006, Radu e Besanger desenvolvem um algoritmo genético multiobjetivo para alocação de equipamentos FACTS (RADU; BESANGER, 2006). Todo o processo evolucionário é desenvolvido para a obtenção da fronteira de Pareto, a qual define as relações entre as funções custo dos equipamentos e uma função objetivo que maximiza a segurança do sistema, ou seja, minimiza o desvio da tensão em relação a 1 pu, bem como minimiza a sobrecarga nas linhas de transmissão e transformadores. Nesse estudo, são utilizados os equipamentos SVC e TCSC. O processo de otimização é focado em estabelecer o local de instalação dos equipamentos FACTS, seu tipo e sua capacidade. Os resultados são obtidos utilizando o sistema IEEE 14 barras e comprovam a possibilidade de aplicar a metodologia para garantir a segurança do sistema. Entretanto, a aplicação do método em sistema reais não é abordada.

Em 2007, Roberto Domingues e outros desenvolvem uma alocação ótima de compensadores estáticos de reativos (SVC) utilizando programação não linear com variáveis binárias para a alocação dos dispositivos (MINGUEZ et al., 2007). Uma vez que o problema é de programação inteiro mista, a técnica de decomposição de Benders é utilizada. A metodologia é aplicada ao sistema teste do IEEE contendo 300 barras, ao sistema Inglês de 40 barras e ao sistema Italiano contendo 1228 barras. Diversas contingências são analisadas e os resultados se mostram melhores do que os obtidos usando análise de sensibilidade.

Em 2008, H. R. Baghaee e outros desenvolvem um Algoritmo Genético para aplicação em sistemas de potência (BAGHAEI et al., 2008). Porém, esse artigo foca, através da localização ótima dos equipamentos

FACTS, em minimizar as perdas do sistema de potência. São modelados os equipamentos FACTS do tipo SVC, TCSC e UPFC. Os resultados são obtidos considerando o sistema teste IEEE 30 barras.

Em 2009 Neida Volpi e outros determinam, através de um algoritmo genético multiobjetivo, a localização ótima de equipamentos FACTS para melhorar a qualidade do sistema de transmissão de uma rede elétrica (VOLPI; ALMEIDA, 2009). A metodologia é aplicada a um sistema real contendo 291 barras.

Por fim, devem ser citados dois trabalhos interessantes para aqueles que iniciam os estudos sobre equipamentos FACTS. Um tutorial escrito por Watanabe e colaboradores fornece informações básicas sobre o funcionamento de equipamentos FACTS e analisa o impacto desses equipamentos na operação de sistemas de potência (WATANABE et al., 1998)

Anos mais tarde, em 2003, Abdel e colaboradores fazem um apanhado geral dos dispositivos FACTS (ABDEL-MOAMEN M.A. PRAVEEN KUMAR, 2005). A ideia é servir de base para futuras pesquisas, pois apresentam modelos detalhados de uma gama muito grande atuais FACTS, inclusive os de segunda geração, baseados em conversores CC-CA (VSC). Através de uma pesquisa das publicações envolvendo equipamentos FACTS no fluxo de potência otimizado (FPO), é feito um resumo contendo as informações mais importantes. Diversas aplicações práticas dos dispositivos são detalhadas e suas principais características são apresentadas e discutidas. Ao todo, mais de 150 (cento e cinquenta) referências são analisadas e tal artigo é ponto de partida para qualquer aplicação dos dispositivos FACTS no problema de fluxo de potência ótimo.

## 1.4 Motivação e Objetivos do Trabalho

Como já discutido anteriormente, a alocação ótima dos equipamentos FACTS é um problema de difícil solução, razão pela qual diversos métodos



heurísticos têm sido aplicados ao problema. Entre os métodos empregados, aqueles que usam conceitos de otimização multiobjetivo são interessantes, pois fornecem um conjunto de possíveis soluções ótimas para o problema. Os trabalhos nesta linha de pesquisa, já citados anteriormente, utilizam o algoritmo de fluxo de carga para obter soluções factíveis para o problema. Este fato pode comprometer as soluções obtidas, pois limites físicos e operacionais do sistema não são considerados.

A obtenção de soluções que respeitam as restrições do sistema elétrico é uma preocupação das metodologias de alocação ótima de equipamentos FACTS baseadas em algoritmos de fluxo de potência ótimo (CHUNG; LI, 2000; LIMA et al., 2003). No entanto, esses trabalhos não usam conceitos de otimização multiobjetivo. Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de resolver as limitações citadas anteriormente.

O presente trabalho é uma combinação dos trabalhos supracitados. Propõe-se aqui o uso de um algoritmo genético multiobjetivo, em conjunto com um algoritmo de fluxo de potência ótimo (ALMEIDA; SALGADO, 2000), para alocar equipamentos FACTS na rede elétrica. Para tanto, leva-se em consideração, simultaneamente, o desempenho do equipamento (critério técnico) e seu custo (critério econômico). Dois critérios técnicos foram analisados independentemente: minimização dos desvios quadráticos das tensões em relação ao perfil plano e maximização da transferência de potência entre áreas. A consideração simultânea dos critérios técnico e econômico faz com que a atenção se volte para a obtenção da fronteira de eficiência do problema (fronteira de Pareto). O trabalho é uma extensão dos estudos realizados em (RADU; BESANGER, 2006; VOLPI; ALMEIDA, 2009), através da inclusão do FPO com modelos mais detalhados para o SVC e o TCSC e da introdução de mecanismos para a preservação da diversidade populacional gerada pelo AGMO.

## 1.5 Organização do Documento

O restante do documento está dividido em 4 capítulos e está estruturado da seguinte maneira:

No Capítulo 2 é apresentada a formulação do problema de alocação ótima de equipamentos FACTS. Primeiramente, é introduzida a modelagem do SVC e do TCSC, bem como suas respectivas modelagem dentro do problema de FPO.

No Capítulo 3 são abordados os aspectos teóricos de problemas de otimização multiobjetivo com variáveis inteiras.

No Capítulo 4 é descrita a implementação do algoritmo genético multiobjetivo (AGMO), utilizado para resolver o problema de alocação ótima de equipamentos FACTS.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações numéricas para diferentes casos, incluindo uma análise do sistema equivalente da Região Sul do Brasil.

Por fim, no Capítulo 6 são tiradas as principais conclusões do estudo e, com intuito de dar continuidade à linha de pesquisa, são propostos trabalhos futuros.

## 2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

### 2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo descreve a formulação matemática do problema a ser resolvido para se obter a alocação ótima de equipamentos FACTS em sistemas elétricos de potência. O problema é multiobjetivo, não linear e inteiro-misto. Sua formulação pode ser considerada uma extensão do problema de fluxo de potência ótimo (FPO). Primeiramente, a modelagem dos equipamentos FACTS é discutida. Neste trabalho são considerados os equipamentos: SVC (Static Var Compensator - Compensador Estático de Reativos) e o TCSC (Tiristor Controlled Series Capacitor - Compensador Série Controlado a Tiristor). Na sequência, é discutido o problema de FPO. A seguir, é descrita a modelagem dos equipamentos FACTS considerados no problema de FPO. São então discutidos os critérios utilizados para determinar a alocação ótima de equipamentos FACTS na rede elétrica e, por fim, o problema de alocação ótima desses equipamentos é descrito.

### 2.2 Modelagem do SVC e TCSC para Operação em Regime Permanente

#### 2.2.1 *Compensador Estático de Reativos - Static Var Compensator(SVC)*

O SVC é constituído utilizando-se um TCR (Thyristor Controlled Reactor - Reator Controlado a Tiristor) e um TSC (Thyristor Switched Capacitor - Capacitor Chaveado a Tiristor). A grande diferença entre o TCR, Figura 2 (a), e o TSC, Figura 2 (b), é o fato de que o TSC não apresenta um controle contínuo.

De acordo com o ângulo de disparo dos tiristores  $t_1$  e  $t_2$  obtém-se uma susceptância variável ( $b_k$ ) cujo valor varia de 0 até  $1/X_L$ . Na sua forma mais simples, o SVC é constituído de um banco de capacitores conectado em paralelo com um TCR. Para ampliar a faixa de atuação, é a esse conjunto um

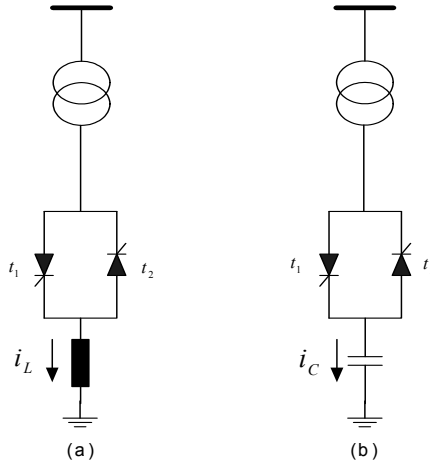


Figura 2: Esquema do Reator Controlado a Tiristor e do Capacitor Chaveado a Tiristor

equipamento TSC, conforme pode ser verificado na Figura 3

A função mais importante do SVC é no controle de tensão através da absorção ou fornecimento de potência reativa. O SVC leva vantagem sobre os capacitores chaveáveis, pois seu controle é rápido suficiente para, por exemplo, acompanhar a evolução da tensão durante um transitório.

Embora o SVC não controle diretamente o fluxo de potência numa linha, ao se inserir um equipamento SVC no meio de uma linha de transmissão, demonstra-se que a amplitude de fluxo de potência ativa transmitida pode ser duplicada. Para demonstrar tal fenômeno, considere o sistema apresentado na Figura 5 (WATANABE et al., 1998). Nesta Figura, a tensão na barra  $m$  é determinada de modo a controlar o fluxo de potência através da linha. Na análise apresentada, as tensões  $V_k$  e  $V_l$  são consideradas como tendo a mesma amplitude porém defasadas de um ângulo  $\delta_{kl}$ .

Sem considerar a inclusão de um equipamento SVC, o fluxo que flui

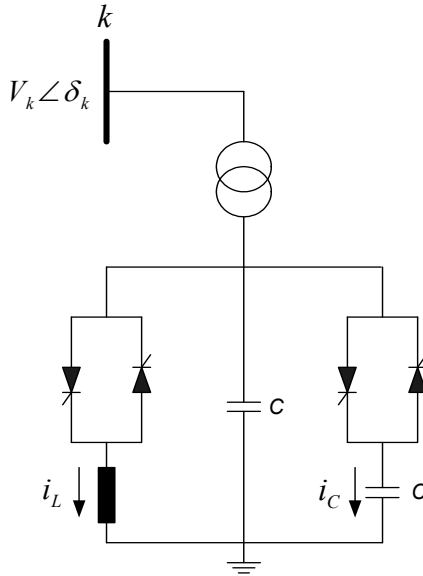


Figura 3: Esquema do SVC

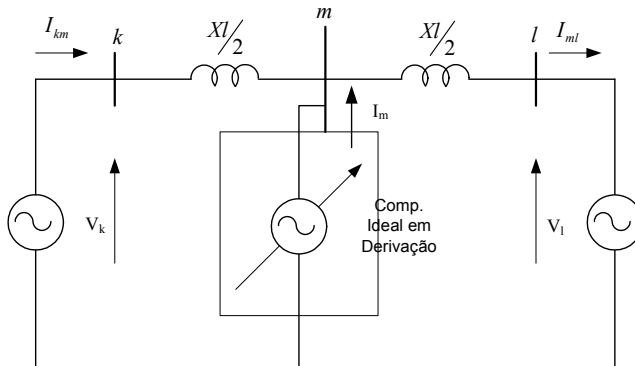


Figura 4: Sistema com SVC

pela linha é dado por:

$$P_{kl} = \frac{V^2}{x_{l_{kl}}} \text{sen}(\delta_{kl}) \quad (2.1)$$

onde  $V$  é a amplitude das tensões  $V_k$  e  $V_l$ , e  $x_{l_{kl}}$  é a reatância da linha. Com a inclusão do equipamento SVC no ponto médio da linha, a potência ativa transferida da barra  $k$  para a barra  $m$  pode ser expressa como:

$$P_{kl} = \frac{2V^2}{x_{l_{kl}}} \text{sen}(\delta_{kl}/2) \quad (2.2)$$

Na Figura 5, é mostrada a curva  $(Px\delta)$  para os casos com e sem compensação, observa-se que, devido à injeção de potência reativa, o compensador permite aumentar em 100% o valor máximo de potência ativa que poderia ser transmitido.

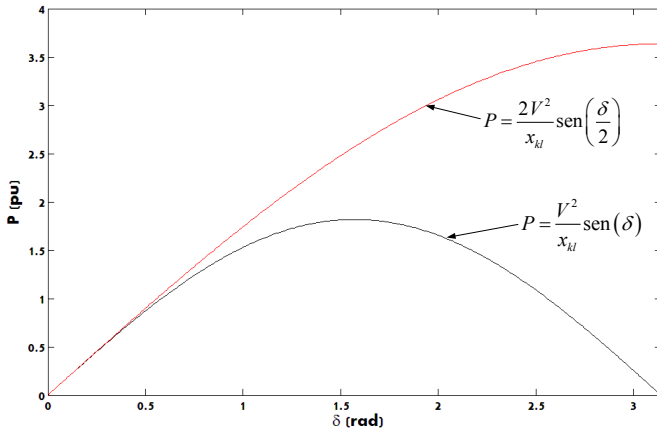


Figura 5: Sistema com SVC

### 2.2.2 Compensador Série Controlado a Tiristor - Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

O TCSC é constituído de uma reatância série  $x_L$  associada em série com tiristores. Esse conjunto é associado em paralelo com um capacitor de reatância  $x_c$ , como pode ser verificado na Figura 6. O equipamento é inserido em série e sua principal função ajustar a reatância série da linha de forma a controlar a potência transmitida pela mesma.

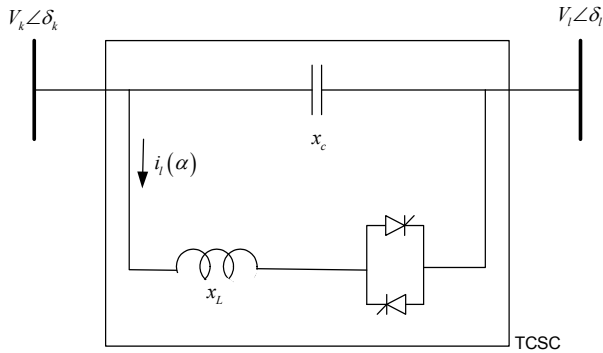


Figura 6: Representação do TCSC

De acordo com o ângulo  $\alpha$  de disparo dos tiristores, cuja atuação controla corrente  $i_L$  que passa pelo indutor, a reatância  $X_{TCSC}$  pode ser definida como:

$$X_{TCSC} = \frac{1}{\frac{1}{X_L(\alpha)} + \frac{1}{X_C}} \quad (2.3)$$

ou,

$$X_{TCSC} = \frac{X_L(\alpha)}{1 - \frac{X_L(\alpha)}{X_C}} \quad (2.4)$$

Quando  $X_L = X_C$ , o TCSC tem reatância infinita, e portanto essa é uma região em que o equipamento não pode operar (zona proibida). Tal região corresponde a passagem da região de reatância indutiva para a região de reatância capacitiva, ou vice-versa.

Com a inserção do equipamento TCSC em série, o fluxo de potência ativa pela linha de transmissão é dado por

$$P_{kl} = \frac{V^2}{x_{lkl}(1-s)} \text{sen}(\delta) \quad (2.5)$$

onde,  $-1 < s < 1$  é a taxa de compensação série. Esta equação mostra que a potência ativa transmitida pode ser aumentada consideravelmente variando-se a taxa de compensação série entre os limites  $0 < s < 1$ .

A Figura 7 apresenta uma análise gráfica da equação (2.5) (curva  $P \times \delta$ ) para diferentes valores de compensação. Pode-se perceber que de acordo com o grau de compensação da linha, determinado por  $k$ , a potência ativa transmitida cresce rapidamente.

A discussão anterior mostra o impacto de um SVC ou de um TCSC num sistema de duas barras e uma linha. Quando inseridos em sistemas maiores, esses equipamentos atuam de forma similar e permitem o controle de tensões e fluxos de potências em regiões críticas para a operação. A correta localização desses equipamentos na rede elétrica é vital para que sejam eficazes na solução dos problemas operativos.

Este trabalho apresenta um algoritmo para alocar de forma ótima os equipamentos do tipo SVC e TCSC num sistema de transmissão. A alocação é feita de forma que as equações de balanço de potência e os limites físicos e operacionais do sistema sejam satisfeitos na presença desses equipamentos. Para tanto, este trabalho modela o problema de alocação dos equipamentos FACTS como uma generalização do problema de fluxo de potência ótimo.



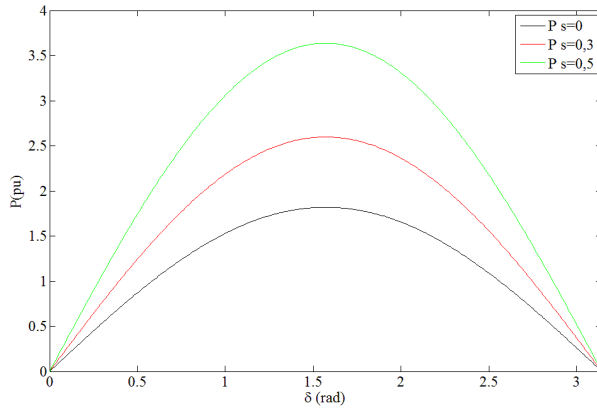


Figura 7: Potência Ativa com TCSC

### 2.3 Fluxo de Potência Ótimo (FPO)

Em sistema elétricos de potência determinar um ponto de operação seguro e que respeite as restrições físicas e operacionais da rede elétrica, cada vez mais presentes nos sistemas atuais, nem sempre é uma tarefa fácil. O atendimento de restrições específicas, como limites mínimo e máximo de magnitudes de tensões em barras de carga bem como fluxo de potência ativa nos circuitos por exemplo, nem sempre é simples de ser alcançada. No entanto, há aproximadamente quatro décadas J. Carpentier ([CARPENTIER, 1962](#)) formulou, pela primeira vez, o problema de operação ótima de um sistema a partir de uma visão geral do mesmo, ou seja, considerando o sistema como um todo. Foi formulado, assim, o problema de fluxo de potência ótimo. A definição de FPO, de acordo com ([CARPENTIER; BORNARD, 1991](#)), é:

*”Uma ferramenta matemática genérica utilizada para determinar um ponto de operação ótimo de um sistema de potência sob restrições que*

*proporcionam factibilidade de operação e, opcionalmente, níveis pré-especificados de segurança.”*

Pode-se definir matematicamente o problema de FPO como um problema de otimização:

$$\min(\max) \quad F \quad (2.6)$$

$$s.a: \quad P_{g_k} - P_{d_k} - P_k(V, \delta, a, \phi) = 0 \quad (2.7)$$

$$Q_{g_k} - Q_{d_k} - Q_k(V, \delta, a, \phi) = 0 \quad (2.8)$$

$$P_{g_k}^{\min} \leq P_{g_k} \leq P_{g_k}^{\max} \quad (2.9)$$

$$Q_{g_k}^{\min} \leq Q_{g_k} \leq Q_{g_k}^{\max} \quad (2.10)$$

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad (2.11)$$

$$a_{kl}^{\min} \leq a_{kl} \leq a_{kl}^{\max} \quad (2.12)$$

$$\phi_{kl}^{\min} \leq \phi_{kl} \leq \phi_{kl}^{\max} \quad (2.13)$$

$$k, l = 1, \dots, nb$$

onde:

- $nb$  é o número de barras do sistema e  $F$  é a função objetivo do problema;
- $P_k$  e  $Q_k$  são as injeções de potência ativa e reativa ;
- $P_{g_k}$  e  $P_{d_k}$  são a potência ativa gerada e demanda ativa na barra  $k$ ;
- $Q_{g_k}$  e  $Q_{d_k}$  são a potência reativa gerada e demanda reativa na barra  $k$ ;

- $V_k$  é a magnitude de tensão na barra  $k$ ;  $V_k^{min}$  e  $V_k^{max}$  são seus respectivos limites mínimo e máximo
- $a_{kl}$  é o tap do transformador variável entre as barras  $k$  e  $l$ ;  $a_{kl}^{min}$  e  $a_{kl}^{max}$  são seus respectivos limites mínimo e máximo;
- $\phi_{kl}$  é o ângulo de defasagem do transformador defasador entre as barras  $k$  e  $l$ ;  $\phi_{kl}^{min}$  e  $\phi_{kl}^{max}$  são seus respectivos limites mínimo e máximo;

Os componentes do problema (2.5) - (2.13) são explicados a seguir:

- A equação (2.6) representa a função objetivo do problema;
- A equação (2.7) representa o balanço de potência ativa em todas as barras do sistema elétrico;
- A equação (2.8) representa o balanço de potência reativa em todas as barras do sistema elétrico;
- As equações (2.9) e (2.10) representam, respectivamente, os limites de potência ativa e reativa;
- As equações (2.11), (2.12) e (2.13), representam, respectivamente os limites na magnitude de tensão nas barras, os limites do tap dos transformadores com tap variável e os limites de defasagem dos transformadores defasadores.

### 2.3.1 Variáveis de Otimização

No problema FPO pode-se definir dois tipos de variáveis. As de controle ou variáveis independentes influenciam diretamente na otimalidade do problema. As variáveis de controle devem ser escolhidas de acordo com o tipo de problema a ser estudado. Os controles mais utilizados são: geração de potência ativa e reativa, tensão em barras de geração, ângulo de defasamento

de transformadores defasadores, tap de transformadores de tensão e injeção de reativos de equipamentos em derivação.

O segundo tipo são as variáveis dependentes, ou seja, variáveis cujo valor depende das variáveis de controle. Destacam-se, os ângulos das tensões e os fluxos de potência ativa e reativa nos circuitos.

### **2.3.2 Funções Objetivo**

A equação (2.6) pode representar diversos índices de desempenho de um sistema de potência, entre eles: o mínimo custo de geração das unidades em operação, as mínimas perdas na transmissão, o desvio quadrático das tensões em relação a valores pré-estabelecidos, o máximo carregamento do sistema ou a máxima transferência de potência entre diferentes regiões do sistema.

### **2.3.3 Restrições de Igualdade**

As restrições de igualdade do FPO correspondem às equações de balanços de potência ativa e reativa em todas as barras do sistema. Entretanto, de acordo com o tipo de aplicação, novas restrições ou equações podem ser acrescentadas ao modelo, como as relativas à modelagem dos equipamentos FACTS ou restrições de segurança.

### **2.3.4 Restrições de Desigualdade**

As restrições de desigualdade no FPO englobam restrições de canalização nas variáveis e restrições funcionais, representando potência reativa gerada e fluxo de potência ativa nos circuitos. Essas restrições refletem limites de operação dos equipamentos ou alguma política operativa específica. As restrições de canalização impõem limites mínimos e máximos na magnitude de tensão, nas potências ativa geradas, nos tap dos transformadores de tensão variáveis e nos ângulos dos transformadores

defasadores. Podem também impor limites a novos equipamentos inseridos na rede elétrica, tal como será discutido a seguir.

A utilização de uma ferramenta computacional de fluxo de potência ótimo proporciona a obtenção de um ponto de operação que respeita os limites físicos e operacionais, modelados por restrições de igualdade e desigualdade, e otimiza um índice de desempenho operativo. Sendo assim, programas de fluxo de potência ótimo podem ser empregados no planejamento da operação ou da expansão do sistema. O presente trabalho utiliza um programa de FPO dentro de uma ferramenta computacional de planejamento da expansão que determina a posição ótima e o tipo de equipamentos FACTS a serem inseridos no sistema. Duas opções de equipamentos são consideradas: SVC e TCSC.

## 2.4 Modelagem dos Equipamentos FACTS no FPO

Equipamentos FACTS podem ser modelados no problema de FPO através da inclusão de novas variáveis de otimização e novas restrições, de acordo com tipo do equipamento.

### 2.4.1 Equipamento SVC

O SVC pode ser modelado como sendo uma susceptância shunt variável conectada a uma barra do sistema. Para que as características de operação do equipamento sejam respeitadas, há a inclusão de uma nova variável na modelagem e duas novas restrições. A Figura 8 mostra a representação do equipamento acoplado à barra  $k$ .

Assim, na barra em que o SVC é inserido, deve-se considerar uma susceptância shunt variável entre limites mínimo e máximo:

$$b_k^{\min} \leq b_k \leq b_k^{\max} \quad (2.14)$$

onde  $b_k$  é uma nova variável do problema. A potência reativa, injetada pelo

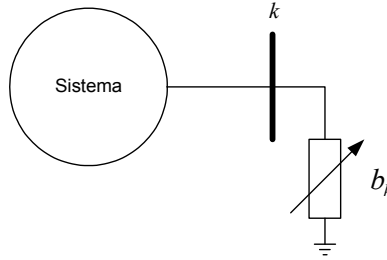


Figura 8: Representação do SVC no FPO

equipamento é calculada como sendo função de  $b_k$  e  $V_k$

$$Q_{svc_k} = b_k V_k^2 \quad (2.15)$$

e, portanto, a equação de balanço de potência reativa na barra onde o equipamento é inserido é alterada, pois deve-se considerar a injeção de potência reativa do SVC. Tal equação se torna:

$$Qg_k - Qd_k + Q(V, \delta, a, \phi) + b_k V_k^2 = 0 \quad (2.16)$$

Deve-se observar que, como geralmente equipamentos FACTS não são inseridos em barras de geração,  $Qg_k = 0$ .

Além da inserção da nova variável no problema, é necessário a inclusão de uma nova restrição ao problema. Tal restrição expressa a potência reativa fornecida pelo equipamento para controlar  $k$  em um valor especificado,  $V_k^{esp}$ .

$$V_k^{esp} = V_k + \beta Q_{svc_k} \quad (2.17)$$

sendo  $\beta$  definido como

$$\beta = \frac{V_k^{\min} - V_k^{\max}}{Q_{svc_k}^{\max} - Q_{svc_k}^{\min}} \quad (2.18)$$

sendo  $Q_{svc_k}^{\max}$  e  $Q_{svc_k}^{\min}$  as potências máxima e mínima do equipamento, respectivamente.

Porém,  $Q_{svc_k}$  é  $b_k V_k^2$  e então a equação se torna:

$$V_k^{esp} = V_k + \beta b_k V_k^2 \quad (2.19)$$

Portanto, a inserção do equipamento SVC além de introduzir uma nova variável no problema FPO ( $b_k$ ), modifica-o da seguinte forma:

- Altera a equação de balanço de potência reativa na barra onde o equipamento é inserido;
- Insere os limites relativos a  $b_k$ ;
- Insere uma nova restrição de igualdade: a equação de controle (2.17).

### 2.4.2 Equipamento TCSC

Para modelar o TCSC no problema FPO é necessária a inclusão de uma nova variável de otimização com seus respectivos limites. Essa variável identifica a reatância série total da linha na qual o equipamento é inserido e as restrições são os limites mínimo e máximo da compensação que o TCSC proporciona.

Da Figura 9 tem-se que a reatância total da linha:

$$x_{kl} = x_{kl}^0 + x_{TCSC} \quad (2.20)$$

sendo  $x_{kl}^0$  a reatância série original da linha que conecta as barras  $k$  e  $l$ . A

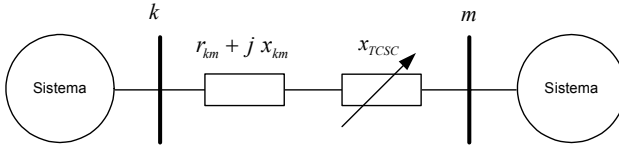


Figura 9: Representação do TCSC no FPO

reatância do equipamento TCSC  $x_{TCSC}$  é variável em duas regiões distintas (HINGORANI, 1988). Na primeira:

$$0 \leq x_{TCSC} \leq x_L^{lim} \quad (2.21)$$

onde  $x_L^{lim}$  representa a máxima reatância indutiva do equipamento. Na segunda região,

$$x_C^{lim} \leq x_{TCSC} \leq 0 \quad (2.22)$$

onde  $x_C^{lim}$  representa a máxima reatância capacitiva do TCSC.

Levando-se em conta esses limites,  $x_{kl}$  tem seu valor máximo

$$x_{kl}^{max} = x_{kl}^0 + x_L^{lim} \quad (2.23)$$

e mínimo

$$x_{kl}^{min} = x_{kl}^0 + x_C^{lim} \quad (2.24)$$

Assim, se a zona proibida de operação do equipamento for desconsiderada, tem-se:

$$x_{kl}^{min} \leq x_{kl} \leq x_{kl}^{max} \quad (2.25)$$



A inserção de um TCSC na rede elétrica modifica a matriz de admitância de barra do sistema e as injeções de potência ativa e reativa nas barras terminais do circuito onde é colocado o equipamento. Para a modelagem desse equipamento no problema FPO as seguintes alterações são feitas:

- Inserção de uma nova variável,  $x_{k,l}$  e de seus limites (2.25) no problema;
- Modificação da matriz admitância de barra do sistema;

A inserção das equações (2.14), (2.16) e (2.19) no problema FPO possibilita que, ao se resolver o problema, seja feito um ajuste na reatância  $b_k$  do SVC de forma a otimizar um critério pré-estabelecido. A inserção da equação (2.25) no problema e a representação de  $x_{kl}$  na matriz admitância de barra do sistema, possibilita um ajuste ótimo da reatância do TCSC para otimizar o critério adotado. No entanto, deve-se observar que os locais de inserção de SVC ou TCSC devem ser bem escolhidos, de forma que esses equipamentos passam a contribuir para a melhoria da operação do sistema. A escolha dos locais ótimos para esses equipamentos é discutida a seguir.

## 2.5 Formulação do Problema de Alocação Ótima de FACTS do Tipo SVC e TCSC

Os estudos necessários para se determinar os tipos, capacidades e localizações ótimas de equipamentos FACTS na rede podem ser classificados como estudos de expansão do sistema. O problema a ser resolvido possui uma formulação matemática complexa, exigindo que o modelo não linear da rede elétrica seja considerado e que estudos sobre o desempenho dinâmico do sistema sejam realizados. Mesmo que o desempenho dinâmico do sistema não seja considerado, como acontece no presente trabalho, as equações algébricas não lineares da rede elétrica elevam consideravelmente a complexidade do problema de otimização a ser resolvido.

Dois critérios são cruciais na definição de reforços do sistema: o econômico e o técnico. A busca de uma solução que minimize o primeiro critério levará a uma solução mais viável. A escolha da solução com maior potencial de resolver os problemas detectados na operação, ou ainda, com maior potencial técnico, levará, em última análise, ao uso eficiente do equipamento por um período maior. Entretanto, esses dois critérios são, muitas vezes, antagônicos. Além disso, devido às suas naturezas diversas, os dois critérios não podem ser combinados. Portanto, é necessário que o problema seja abordado na forma multiobjetivo e que a otimização vise a obtenção da fronteira de eficiência ou Pareto-ótima (DEB; KALYANMOY, 2001).

Dois critérios técnicos, representados por diferentes funções objetivo,  $F_t$ , são analisados no presente trabalho. A primeira função objetivo, denominada MDT, representa a o desvio quadrático das magnitudes de tensão em relação a um valor de referência. Alocam-se os equipamentos FACTS que minimizem o valor de MDT, que é expressa como:

$$MDT = \sum_{k=1}^n \left( \frac{V_k^{ref} - V_k}{V_k^{ref}} \right)^2 \quad (2.26)$$

onde  $V_k^{ref}$  e  $V_k$  representam o valor de referência e o valor calculado da magnitude de tensão da barra  $k$ , respectivamente, e  $n$  é o número de barras do sistema.

A segunda função técnica analisada representa o somatório dos fluxos nas linhas que interligam diferentes áreas do sistema (MFL). A inserção dos equipamentos é feita para maximizar MFL, que pode ser expressa como:

$$MFL = \sum_{i \in \Omega} fl_i \quad (2.27)$$

onde  $\Omega$  representa o conjunto de linhas de interligação e  $fl_i$  representa o fluxo de potência ativa na linha  $i$ .

O critério econômico, expresso por  $F_e$ , representa os custos dos

equipamentos SVC ( $C_{sh}$ ) e TCSC ( $C_s$ ). Tais custos são obtidos através de aproximações quadráticas das curvas apresentadas em (CAI; ERLICH; STAMTSIS, 2004) e reproduzidas na Figura 1:

$$C_{sh} = 0,003 (Q_{svc_k})^2 - 0,3051 (Q_{svc_k}) + 127,38 \quad (\text{US\$/kVAr}) \quad (2.28)$$

$$C_s = 0,015 (Q_{tcsc_k})^2 - 0,713 (Q_{tcsc_k}) + 153,75 \quad (\text{US\$/kVAr}) \quad (2.29)$$

onde  $Q_{svc_k}$  e  $Q_{tcsc_k}$  são as potências reativas em MVar injetadas pelo SVC e TCSC, respectivamente.

Assim, a função econômica ( $F_e$ ) é definida como sendo:

$$F_e = C_{sh} + C_s \quad (\text{US\$/kVAr}) \quad (2.30)$$

As soluções com equipamentos FACTS devem satisfazer todas as restrições de balanço de potência ativa e reativa da rede, os limites físicos e operacionais do sistema, inclusive os limites dos próprios equipamentos FACTS, e também as equações que regem a operação desses equipamentos em regime permanente. Além do critério técnico, tais soluções são analisadas do ponto de vista econômico. Tendo em mente essas considerações, o problema de alocação ótima de equipamentos FACTS do tipo SVC e TCSC pode ser matematicamente expresso como uma extensão do problema de fluxo de potência ótimo:

$$\min \quad [F_t(u), F_e(u)] \quad (2.31)$$

$$s.a: \quad P_{gk} - P_{dk} - P_k(t, y, u) = 0 \quad (2.32)$$

$$Q_{gk} - Q_{dk} - Q_k(t, y, u) + b_k V_k^2 = 0 \quad (2.33)$$

$$V_k^{esp} = V_k + \beta b_k V_k^2 \quad (2.34)$$

$$P_{gk}^{\min} \leq P_{gk} \leq P_{gk}^{\max} \quad (2.35)$$

$$Q_{gk}^{\min} \leq Q_{gk} \leq Q_{gk}^{\max} \quad (2.36)$$

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad (2.37)$$

$$b_k^{\min} \leq b_k \leq b_k^{\max} \quad (2.38)$$

$$a_{kl}^{\min} \leq a_{kl} \leq a_{kl}^{\max} \quad (2.39)$$

$$\phi_{kl}^{\min} \leq \phi_{kl} \leq \phi_{kl}^{\max} \quad (2.40)$$

$$x_{kl}^{\min} \leq x_{kl} \leq x_{kl}^{\max} \quad (2.41)$$

$$y \in 1, 2, \dots, nl \quad (2.42)$$

onde:

- $F_t$  representa uma das funções técnicas analisadas e  $F_e$  a função econômica;
- $t$  representa as variáveis do sistema, excluindo as variáveis de controle dos equipamentos FACTS, ou seja, um vetor contendo  $[\delta_k, V_k, a_{kl}, \phi_{kl}]$ ;
- O vetor  $u$  representa as variáveis de controle dos equipamentos FACTS;
- O vetor  $y$  representa posição dos equipamentos FACTS no sistema;

O problema (2.31)-(2.42) possui dois tipos de variáveis. Os vetores  $t$  e  $u$  são compostos por variáveis reais; o vetor  $y$  é composto por variáveis inteiras que representam os índices das posições dos equipamentos FACTS na rede.

Como as restrições são não-lineares (não convexas),  $F$  é vetorial, e  $y \in N$ , o problema é não-linear, multiobjetivo e inteiro-misto. Deve-se observar que o problema é formulado como sendo de minimização. Desta forma, caso se queira adotar como critério técnico a máxima transferência de potência entre regiões obtida com a inserção dos equipamentos FACTS, deve-se fazer  $F_i = -MFL$ .

## 2.6 Conclusões

Este capítulo descreveu o problema de alocação de equipamentos FACTS em sistemas elétricos de potência. Primeiramente foi feita uma breve descrição dos equipamentos FACTS existentes e foi apresentada a modelagem dos equipamentos de primeira geração usados neste trabalho. O problema de fluxo de potência ótimo (FPO) foi então introduzido e as representações dos equipamentos SVC e TCSC no problema FPO foram abordadas. Por fim, a modelagem completa do problema de alocação ótima dos equipamentos FACTS nos sistemas de transmissão foi apresentada.

Como o problema a ser resolvido é multiobjetivo e possui variáveis inteiras, no próximo capítulo são discutidas algumas características de problemas como este. São também descritas algumas técnicas de solução de tais problemas.



## **3 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO INTEIRO MISTA**

### **3.1 Considerações Iniciais**

Em problemas de otimização multiobjetivo, independentemente de existirem apenas variáveis reais ou variáveis inteiras e reais, busca-se otimizar simultaneamente um conjunto de critérios satisfazendo um conjunto de restrições, resultantes do tipo de modelagem do problema. Neste capítulo, em primeiro lugar, são apresentados alguns conceitos associados à otimização multiobjetivo; em seguida é introduzido o conceito da fronteira de Pareto e são descritos métodos para se obter soluções pertencentes a essa fronteira. Posteriormente, são descritas algumas características de problemas com variáveis inteiras e apresentadas algumas técnicas usadas na sua resolução.

### **3.2 Abordagem Multiobjetivo**

#### **3.2.1 Introdução**

Quando um problema de otimização é abordado na forma multiobjetivo, um conjunto de objetivos estão sendo avaliados dentro da região definida pelas restrições do problema. A abordagem é empregada quando os objetivos a serem otimizados são conflitantes e não podem ser combinados. Portanto, não existe uma única solução para o problema, mas sim um conjunto de soluções, no qual nenhuma solução é melhor que outra em todos os objetivos analisados.

Matematicamente, pode-se definir um problema de otimização multiobjetivo da seguinte maneira (ARROYO, 2002):

$$\min \quad \mathbf{z} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)] \quad (3.1)$$

$$s.a: \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_p(x)] \leq \mathbf{b} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{z} \in \mathbf{Z} \quad (3.4)$$

onde  $\mathbf{x}$  é o vetor formado pelas variáveis de decisão do problema,  $\mathbf{z}$  é o vetor contendo os objetivos,  $\mathbf{X}$  denota o espaço de decisões, e  $\mathbf{Z}$  é a imagem de  $\mathbf{X}$  denominada espaço objetivo. As restrições  $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{b}$ ,  $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^p$  e o espaço  $\mathbf{X}$  determinam o conjunto das soluções factíveis, ou seja,  $\mathbf{X}^* = \{\mathbf{x} \in \mathbf{X} : \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{b}\}$ . A imagem de  $\mathbf{X}^*$  denominado espaço objetivo factível, é determinada por  $\mathbf{Z}^* = \mathbf{f}(\mathbf{X}^*) = \{\mathbf{f}(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in \mathbf{X}^*\}$

### 3.2.2 Dominância de Pareto

Em processos de otimização de um único objetivo o espaço de busca é considerado *completamente ordenado*, ou seja, dados quaisquer  $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbf{X}^*$  é sempre verdade que: ou  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \geq \mathbf{f}(\mathbf{y})$  ou  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{f}(\mathbf{y})$ . Entretanto, conforme (ARROYO, 2002) em otimização multiobjetivo o espaço de busca é determinado *parcialmente ordenado* e dados dois vetores de decisão, existe três possibilidades para seus correspondentes vetores objetivos:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{f}(\mathbf{y}), \quad \mathbf{f}(\mathbf{y}) \leq \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad \text{ou} \quad (\mathbf{f}(\mathbf{x}) \not\leq \mathbf{f}(\mathbf{y}) \text{ e } \mathbf{f}(\mathbf{y}) \not\leq \mathbf{f}(\mathbf{x})) \quad (3.5)$$

Por exemplo:

- Se  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [7, 3]$  e  $\mathbf{f}(\mathbf{y}) = [9, 4]$  então  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) < \mathbf{f}(\mathbf{y})$ .



- Se  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [7, 3]$  e  $\mathbf{f}(\mathbf{y}) = [9, 2]$  então  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \not\leq \mathbf{f}(\mathbf{y})$  e  $\mathbf{f}(\mathbf{y}) \not\leq \mathbf{f}(\mathbf{x})$

Podem ser estabelecidas definições matemáticas para a dominância de Pareto. Estas são apresentadas a seguir:

**Definição 1. (Dominância de Pareto no Espaço Objetivo Factível em  $Z^*$ )**

Para quaisquer dois vetores objetivos  $\mathbf{z}^1 = (z_1^1, \dots, z_r^1)$  e  $\mathbf{z}^2 = (z_1^2, \dots, z_r^2)$ , diz-se que:

- $\mathbf{z}^1$  domina  $\mathbf{z}^2$  se  $\mathbf{z}^1 \leq \mathbf{z}^2$  e  $\mathbf{z}^1 \neq \mathbf{z}^2$ , isto é,  $\forall j, z_j^1 \leq z_j^2$  e para algum  $j$ ,  $z_j^1 < z_j^2$
- $\mathbf{z}^1$  e  $\mathbf{z}^2$  são indiferentes (ou possuem o mesmo grau de dominância) se  $\mathbf{z}^1$  não domina  $\mathbf{z}^2$  nem  $\mathbf{z}^2$  domina  $\mathbf{z}^1$

**Definição 2. (Dominância de Pareto no Conjunto de Soluções Factíveis  $X^*$ )**

Para quaisquer duas soluções  $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in X^*$  diz-se que:

- $\mathbf{x}$  domina  $\mathbf{y}$  se a imagem de  $\mathbf{x}$  domina a imagem de  $\mathbf{y}$ , isto é,  $f(\mathbf{x}) \leq f(\mathbf{y})$  e  $f(\mathbf{x}) \neq f(\mathbf{y})$
- $\mathbf{x}$  é indiferente com  $\mathbf{y}$  se a afirmação  $f(\mathbf{x}) \leq f(\mathbf{y})$  não é verdadeira para todos as componente do vetor de objetivos

**Definição 3. (Otimalidade de Pareto)**

- Diz-se que  $\mathbf{x}^* \forall X^*$  é uma *solução eficiente* (Pareto Ótima) se não existir qualquer outra solução  $\mathbf{x} \forall X^*$  tal que  $\mathbf{x}$  domine  $\mathbf{x}^*$ ;  $\mathbf{z}^* = \mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$  é chamado *ponto eficiente* ou ponto Pareto ótimo.
- O conjunto de todas as soluções eficientes é denominado conjunto eficiente ou conjunto Pareto ótimo.

- A imagem em  $Z^*$  do conjunto Pareto ótimo é denominada *fronteira de eficiência*.

Na Figura 10 (a) é apresentado um espaço objetivo de um problema de otimização com dois objetivos. Pode-se exemplificar o conceito de dominância de Pareto simplesmente analisando o ponto central da figura (C). A Fronteira de Pareto deste exemplo é indicada na Figura 10(b), sendo composta pelos pontos M, A, B, D e F.

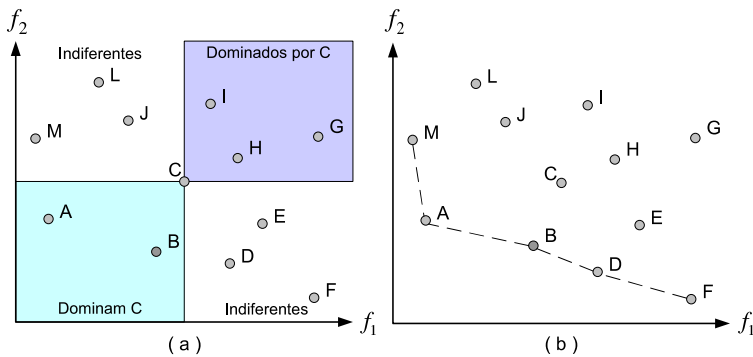


Figura 10: Dominância de Pareto no espaço objetivo

As soluções pertencentes ao retângulo inferior esquerdo (pontos A e B) dominam o indivíduo C, pois possuem objetivos menores que C. Por outro lado, as soluções pertencentes ao retângulo superior direito (pontos G, H e I) são dominados por C, pois tais pontos possuem objetivos maiores que C. Porém, as soluções pertencentes aos retângulos superior esquerdo e inferior direito não dominam e nem são dominados por C e por isso são considerados indiferentes a C.

Através da análise dos indivíduos presentes na população pode-se definir, conforme apresentado na Figura 10 (b), a fronteira de Pareto do problema. Ela é composta por todos os indivíduos nao-dominados. Contudo, a fronteira

de Pareto pode ser constituída de outras formas, como mostra a Figura 11. No extremo superior esquerdo da Figura é apresentada a fronteira de Pareto (parte sólida da curva) para a minimização de ambos objetivos  $f_1$  e  $f_2$ . Note que a análise é semelhante a apresentada anteriormente na Figura 10. Se por ventura o objetivo  $f_1$  é minimizado e o objetivo  $f_2$  é maximizado a fronteira de Pareto é completamente alterada, como pode-se verificar no extremo superior direito da figura. Note que, neste caso, a fronteira de Pareto é dividida em duas partes, devido ao espaço objetivo não ser convexo. Além disso, mais duas possibilidades são apresentadas. Uma, apresentada no extremo inferior esquerdo, a função objetivo  $f_1$  é maximizada enquanto que a função objetivo  $f_2$  é minimizada. Por fim, no extremos inferior direito é apresentada uma situação ambos objetivos  $f_1$  e  $f_2$  são maximizados.

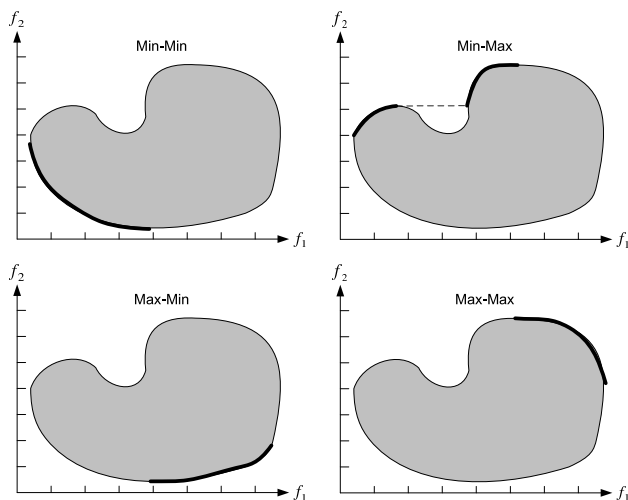


Figura 11: Diferentes fronteiras de Pareto

Métodos de otimização multiobjetivo buscam obter pontos na fronteira de Pareto. Uma vez que usualmente essa fronteira é formada por vários pon-

tos, os métodos muitas vezes buscam obter não somente uma, porém várias soluções para o problema multiobjetivo.

### 3.3 Exemplo de Abordagem Multiobjetivo

A título de exemplo, faz-se uma análise das soluções dominantes de um problema de fluxo de potência ótimo multiobjetivo. Conforme apresentado na Figura 12, o problema é definido para um sistema de 2 barras considerando-se cargas ativa e reativa genéricas na barra 2. Busca-se simultaneamente minimizar o desvio quadrático das tensões em relação a um valor estabelecido e minimizar as perdas de potência ativa na linha de transmissão.

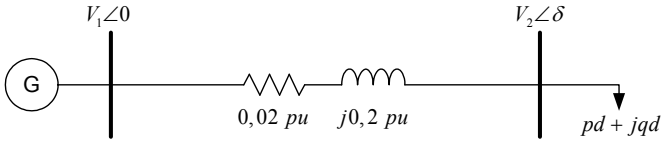


Figura 12: Exemplo - Problema Multiobjetivo

Matematicamente, pode-se representar o problema como:

$$\text{Min } f_1 = (V_1 - 1)^2 + (V_2 - 1)^2 \quad (3.6)$$

$$f_2 = \text{perdas} \quad (3.7)$$

$$\text{s.a : } pg_i - pd_i - p_i(V, \delta) = 0 \quad (3.8)$$

$$qg_i - qd_i - q_i(V, \delta) = 0, i = 1, 2 \quad (3.9)$$

Usando os dados de linha indicados na Figura 12 tem-se que:

$$p_1(V, \delta) = 0,49V_1^2 + V_1V_2(-0,49\cos\delta - 4,95\sin\delta) \quad (3.10)$$

$$p_2(V, \delta) = 0,49V_2^2 + V_1V_2(-0,49\cos\delta + 4,95\sin\delta) \quad (3.11)$$

$$q_1(V, \delta) = 4,95V_1^2 + V_1V_2(0,49\sin\delta - 4,95\cos\delta) \quad (3.12)$$

$$q_2(V, \delta) = 4,95V_2^2 + V_1V_2(-0,49\sin\delta - 4,95\cos\delta) \quad (3.13)$$

As perdas na linha de transmissão, são calculadas somando-se as injeções de potência ativa, ou seja:

$$perdas = p_1(V, \delta) + p_2(V, \delta) = 0,49(V_1^2 + V_2^2) - 0,98V_1V_2\cos\delta \quad (3.14)$$

Tomando a barra 1 como barra de folga, pode-se representar o problema apenas em termos das equações de balanço de potência da barra 2. Portanto, o FPO multiobjetivo pode ser representado como:

$$Min \quad f_1 = (V_1 - 1)^2 + (V_2 - 1)^2 \quad (3.15)$$

$$f_2 = 0,49(V_1^2 + V_2^2) - 0,98V_1V_2\cos\delta \quad (3.16)$$

$$s.a: \quad -pd - 0,49V_2^2 - V_1V_2(-0,49\cos\delta + 4,95\sin\delta) = 0 \quad (3.17)$$

$$-qd - 4,95V_2^2 - V_1V_2(-0,49\sin\delta - 4,95\cos\delta) = 0 \quad (3.18)$$

Para obter o conjunto viável do problema descrito por (3.15) - (3.18), faz-se necessário resolver as equações (3.17) e (3.18). Multiplicando (3.17) por 4,95 e (3.18) por  $-0,49$ , e somando as novas equações obtém-se:

$$-24,74V_1V_2\sin\delta = 4,95pd - 0,49qd \quad (3.19)$$

Multiplicando agora (3.17) por 0,49, (3.18) por 4,95 e somando as novas equações, obtém-se:

$$24,74V_1V_2\cos\delta = 24,74V_2^2 + 0,49pd + 4,95qd \quad (3.20)$$

Elevando (3.19) e (3.20) ao quadrado e somando os resultados obtém-se a equação que deve ser satisfeita por todos os valores de  $V_1$  e  $V_2$  viáveis:

$$612,07V_1^2V_2^2 = (4,95pd - 0,49qd)^2 + (24,74V_2^2 + 0,49pd - 4,95qd)^2 \quad (3.21)$$

Além disso, sabe-se que, de (3.20):

$$V_1V_2\cos\delta = V_2^2 + \frac{0,49}{24,74}pd + \frac{4,95}{24,74}qd \quad (3.22)$$

Substituindo (3.22) na expressão das perdas (3.14), obtém-se:

$$perdas = 0,49V_1^2 - 0,49V_2^2 - 19,4 \times 10^{-3}pd - 196,07 \times 10^{-3}qd \quad (3.23)$$

Assim, o problema de fluxo de potência ótimo multiobjetivo pode ser expresso em função das variáveis  $V_1$  e  $V_2$  e das cargas ativa e reativa:

$$\text{Min } f_1 = (V_1 - 1)^2 + (V_2 - 1)^2 \quad (3.24)$$

$$f_2 = 0,49(V_1^2 - V_2^2) - 19,4 \times 10^{-3}pd - 196,07 \times 10^{-3}qd \quad (3.25)$$

$$s.a: \quad 612,07V_1^2V_2^2 = (4,95pd - 0,49qd)^2 + (24,74V_2^2 + 0,49pd + 4,95qd)^2 \quad (3.26)$$

Considerando os valores de  $pd = 3pu$  e  $qd = 0,5pu$ , a Figura 13 apresenta a região viável do problema (curva em azul) e as curvas de nível das duas funções objetivo.

As curvas de nível em vermelho correspondem à função de desvio quadrático de tensão,  $f_1$ . O mínimo irrestrito dessa função ocorre em  $V_1 = V_2 = 1,0pu$  e a função decresce no sentido indicado pela seta F1 na Figura. As curvas de nível em preto correspondem à função de perdas de transmissão,  $f_2$ . Conforme pode ser verificado pela expressão (2.26) e por essas curvas de nível,  $f_2$  é um parabolóide hiperbólico e não possui um mínimo irrestrito. As setas F2 na Figura indicam o sentido de decréscimo de  $f_2$ .

Ao se analisar a Figura 13, nota-se que ao se deslocar pela região viável do problema (curva em azul) o valor das funções objetivo são alterados. No entanto, não há, na região viável do problema, a otimização simultânea do desvio quadrático de tensão e das perdas na linha de transmissão. A medida que se otimiza  $f_1$ , há a degradação do objetivo  $f_2$ , o que caracteriza o problema como sendo de dois objetivos conflitantes. Tal informação fica ainda mais clara ao se analisar a Figura 14 na qual são mostrados os gráficos das duas funções objetivo do problema. Percebe-se claramente o conflito dos dois objetivos na medida que é impossível minimizar ambos simultaneamente.

Para se obter o mínimo desvio quadrático de tensão, tanto  $V_1$  quanto

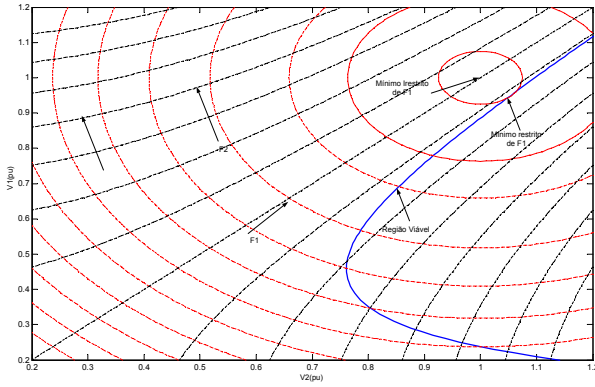


Figura 13: Região viável do exemplo multiobjetivo

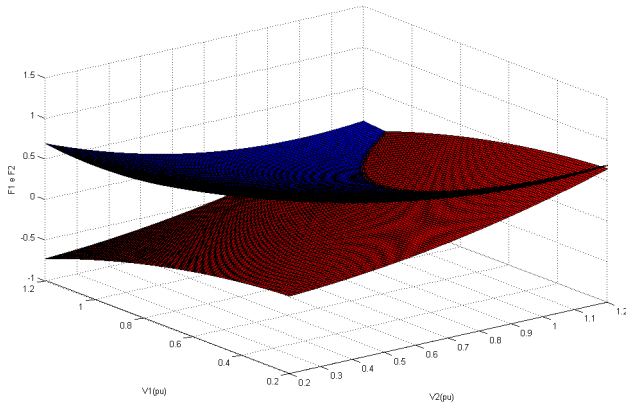


Figura 14: Objetivos  $f_1$  e  $f_2$  do exemplo

$V_2$  devem possuir valores de  $1pu$ . Porém, a Figura 13 mostra que para se minimizar a perda na linha, deve-se caminhar na direção da seta  $F_2$ , ou seja,



aumentar o valor da tensão  $V_1$ .

Ao se mapear as soluções presentes na região viável apresentada na Figura 13, obtém-se o gráfico  $f_1 \times f_2$ . Esse gráfico representa o valor dos objetivos de cada solução apresentada no espaço  $V_1 \times V_2$ . Com isso, é possível obter a fronteira de Pareto do problema (3.24) – (3.26) que é apresentada na Figura 15

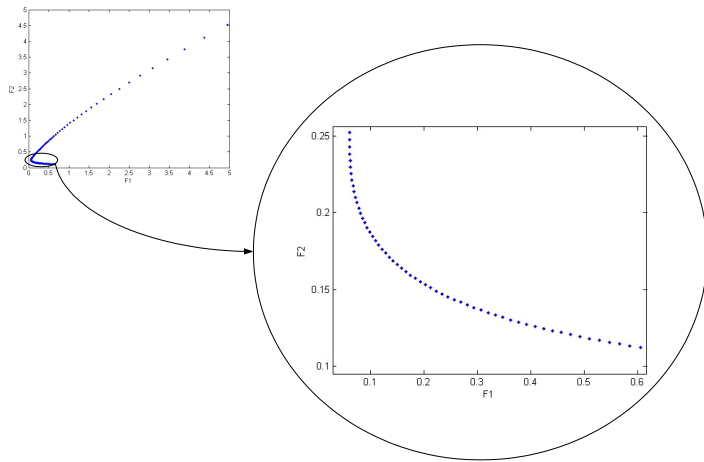


Figura 15: Espaço objetivo - exemplo de 2 barras

Analisando a Figura 15, ratifica-se a ideia apresentada anteriormente de que os objetivos são conflitantes entre si. Novamente, fica comprovado que para se obter mínima perda no sistema, deve-se operar com o máximo desvio de tensões. Da Figura 15 percebe-se que a mínima perda na linha de transmissão - em torno de  $0,11 pu$  - é obtida com o o valor máximo da soma dos desvios quadráticos de tensão - em torno de  $0,6 pu$ .

Com o exemplo apresentado, foi possível apresentar os conceitos envolvidos em otimização multiobjetivo, entre eles a fronteira de Pareto.

### 3.4 Métodos de otimização Multiobjetivo

A dominância de Pareto foi apresentada anteriormente através da análise de um problema contendo dois objetivos conflitantes. No entanto, em aplicações reais pode-se ter o vetor de objetivos composto por diversos objetivos, o que pode, em alguns casos, aumentar o número de soluções para o problema. Tendo em vista esses fatores, a otimização multiobjetivo tem como meta:

1. A procura por soluções que estejam o mais próximo possível da fronteira de Pareto;
2. A obtenção de soluções com maior diversidade possível.

O primeiro aspecto é análogo ao que se tem em otimização mono-objetivo, pois estão na fronteira de Pareto todas as soluções que apresentam as melhores características do problema. Em otimização multiobjetivo, a fronteira de Pareto pode ser comparada com o ótimo global de um problema monobjetivo.

Por outro lado, o segundo aspecto é muito específico de otimização multiobjetivo. Além de buscar as soluções presentes na fronteira de Pareto, é extremamente importante diversificar ao máximo o conjunto de soluções. A diversidade das soluções pode ser analisada de duas formas: (i) verificando a distância entre duas diferentes soluções no espaço de decisão ou (ii) verificando a distância entre duas diferentes soluções no espaço objetivo.

A busca de soluções e a tomada de decisão são dois aspectos distintos e de fundamental importância para a caracterização dos diferentes métodos de solução de problemas multiobjetivos. O primeiro aspecto diz respeito a como a busca será direcionada, uma vez que o objetivo é a obtenção da fronteira de eficiência. A tomada de decisão envolve um critério para que o decisor faça uma ponderação entre os objetivos. Com base no ponto de vista do decisor, os

métodos para a solução de problemas multiobjetivos podem ser classificados em três categorias, descritas a seguir.

### **3.4.1 Métodos a-priori**

São métodos que se caracterizam pela atuação do decisor antes do processo de otimização. Usam informações a respeito da importância dos objetivos e, geralmente, encontram somente uma solução para o problema. Duas maneiras bastante empregadas para o decisor participar do processo e essas são descritas a seguir.

#### **3.4.1.1 Método da Soma Ponderada**

Considerado o método multiobjetivo mais simples e mais difundido, o método da soma ponderada combina os objetivos do problema em um único objetivo, sendo necessária a determinação de pesos para cada objetivo analisado. Quando um problema com múltiplos objetivos é analisado, a ideia mais simples é considerar todos os objetivos simultaneamente, ou seja, atribuir pesos iguais a todos os objetivos.

A definição dos pesos, no entanto, dá-se proporcionalmente à importância do objetivo ao problema. Pode-se, por exemplo, considerar o sistema fictício de 2 barras apresentado anteriormente, no qual dois objetivos foram considerados: (i) minimizar o desvio de magnitudes de tensão em relação a 1 pu e (ii) minimizar as perdas de potência ativa na linha de transmissão. Ao se utilizar o método da soma ponderada, é necessária a ponderação a-priori dos objetivos, ou ainda, a definição dos pesos a serem utilizados no processo de otimização.

O certo é que a responsabilidade de atribuir pesos aos objetivos é do decisor e, em muitos casos, tem como base sua experiência no processo em questão. Após a atribuição dos pesos dos objetivos, pode-se matematicamente definir o problema de otimização como sendo:

$$\min \quad F(x) = \sum_{m=1}^k w_m f_m(x), \quad (3.27)$$

$$(3.28)$$

$$s.a : \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (3.29)$$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} \quad (3.30)$$

onde  $w_m \in [0, 1]$  são os pesos de cada objetivo. Esses pesos são geralmente normalizados, tais que:

$$\sum_{m=1}^k w_m = 1 \quad (3.31)$$

Assim, dá-se início a um processo mono-objetivo e técnicas clássicas de otimização podem ser aplicadas. A maior vantagem deste método é a simplicidade, pois o conceito é intuitivo e de fácil implementação. Os resultados obtidos utilizando esse tipo de abordagem são amplamente dependentes dos valores de  $w_m$  que, além de servirem como ponderações no processo de otimização, servem também como constantes para normalizar diferentes objetivos. Quando o espaço de busca é convexo, o método da soma ponderada encontra soluções por toda a fronteira de Pareto. Entretanto, quando o espaço de busca é não convexo o método deve ser aplicado com, no mínimo, cautela. Para exemplificar essa deficiência do método, suponha um problema com dois objetivos,  $f_1$  e  $f_2$ . Considerando os pesos  $w_1$  e  $w_2$ , com  $w_2 = 1 - w_1$ , pelo método dos pesos, minimiza-se a seguinte função (ARROYO, 2002):

$$y = w_1 f_1(x) + (1 - w_1) f_2(x), \quad x \in X^* \quad (3.32)$$

Tal equação pode ser escrita como:

$$f_2(x) = -\frac{w_1}{(1-w_1)}f_1(x) + \frac{y}{(1-w_1)} \quad (3.33)$$

A equação (3.33) é uma reta cuja inclinação é  $-w_1/(1-w_1)$  e intersecta o eixo  $f_2$  em  $y/(1-w_1)$ .

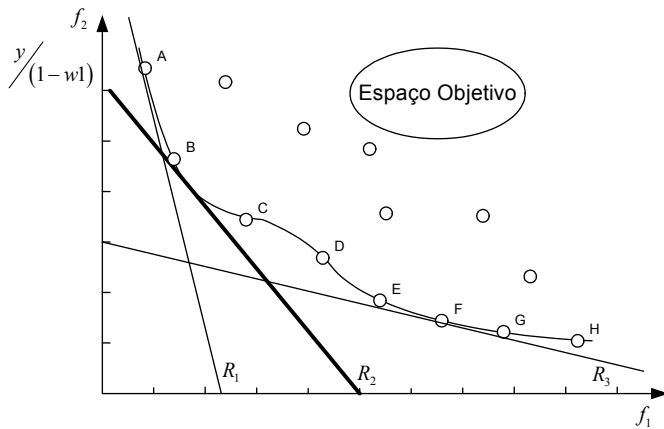


Figura 16: Interpretação gráfica do método da soma ponderada

Para cada peso  $w_1$  tem-se uma nova função linear em  $f_1$  e  $f_2$  (uma reta na Figura 16) que, ao ser minimizada se desloca verticalmente através do conjunto de soluções no espaço objetivo até que se encontre o ponto de mínimo (por exemplo, o ponto B da Figura 1). Ao variarmos  $w_1$ , definimos um conjunto de retas, denominadas retas suporte, que aproximam linearmente a fronteira de Pareto. Se o problema multiobjetivo é convexo, a fronteira de Pareto também é convexa e teoricamente todos os pontos dessa fronteira poderão ser obtidos variando-se  $w_1$ . No entanto, no caso de problemas não convexos, tem-se fronteiras de Pareto não convexas, ou seja, possuem formato semelhante à mostrada na Figura 16. Como pode ser visto na Figura, nem todos os pontos da fronteira podem ser atingidos ao se minimizar a função y

para diferentes pesos (na Figura, os pontos C e D não seriam obtidos). Esta é uma limitação importante do método dos pesos.

A grande dificuldade do método da soma ponderada é o fato de ser necessário um conhecimento prévio do problema para a obtenção apropriada dos pesos dos objetivos. Essa não é uma tarefa simples. Além disso, conforme apresentado anteriormente, quando o espaço objetivo é não convexo e multimodal o método apresenta falhas na obtenção da fronteira de eficiência.

### 3.4.1.2 Método $\varepsilon$ -restrito

Nesse tipo de abordagem, diferentemente do método da soma ponderada, os objetivos do problema são ordenados conforme a prioridade. Então, um processo de otimização é aplicado ao primeiro objetivo, desconsiderando os demais. Sendo o valor ótimo do primeiro objetivo obtido, o segundo objetivo é analisado, porém acrescentando-se uma nova restrição de desigualdade ao problema que força o primeiro objetivo a ser no máximo igual ao seu valor ótimo encontrado na primeira etapa. A seguir, o processo é repetido para o terceiro objetivo considerando-se duas novas restrições ao problema, que limitam os valores das funções já otimizadas nesta nova etapa de otimização. Formalmente, em cada etapa resolve-se o seguinte problema de otimização::

$$\min \quad f_{\pi}(x) \quad (3.34)$$

$$(3.35)$$

$$s.a : \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{b}, \quad i = 1, 2, \dots, k \text{ e } i \neq \pi \quad (3.36)$$

$$s.a : \quad \mathbf{x} \in \mathbf{X} \quad (3.37)$$

onde  $\varepsilon_i$  são os limitantes superiores dos objetivos  $f_i$ .

A grande dificuldade associada ao método é a definição dos limitantes

superiores  $\varepsilon_i$ . Pode-se notar, analisando o problema que, se o limitante superior não for selecionado adequadamente, o espaço obtido pelas restrições pode ser vazio, ou seja, o problema não possui solução.

### 3.4.2 Métodos *a-posteriori*

Nestes métodos, o procedimento de decisão é feito logo após a realização da busca de soluções. Caracterizam-se pela participação do decisor, sendo apresentado como solução do problema, a fronteira de eficiência (Pareto). Tais métodos consideram a igualdade de importância dos objetivos, sendo o decisor o responsável por escolher uma solução que mais se adapte ao problema em questão.

Este tipo de análise foi utilizada para solucionar o exemplo anteriormente apresentado. Como pode ser verificado na Figura 15, existem várias soluções para o problema multiobjetivo. Após o processo de otimização, há uma segunda etapa, contendo a escolha da solução que mais interessa ao decisor.

### 3.4.3 Métodos Iterativos

A principal característica dessas metodologias é a intervenção do decisor ao longo do processo iterativo. Ele pode, por exemplo, alterar parâmetros da simulação e consequentemente intervir no processo de otimização para guiar a busca a regiões nas quais existam soluções de interesse.

### 3.4.4 Aplicações - Problema de Fluxo de Potência Ótimo Multiobjetivo

O problema de fluxo de potência ótimo multiobjetivo com variáveis reais foi analisado por diferentes pesquisadores. Um dos primeiros estudos foi feito por Yokoyama e colaboradores (YOKOYAMA et al., 1988). Nele, o problema FPO é formulado considerando três diferentes objetivos: custo de geração, impacto ao meio ambiente e sobrecarga nos circuitos, e o método de

solução empregado é baseado no método  $\varepsilon$ -restrito. Um método multiobjetivo é empregado por Schiochet (SCHIOCHET, 2006). Neste último trabalho, um problema de fluxo de potência ótimo multiobjetivo é formulado usando como critérios de desempenho representando associações dos parâmetros da carga e dos limites, com a função objetivo do problema original. Em (ROSEHART; CANIZARES; QUINTANA, 2003) é proposto uma metodologia multiobjetivo para otimizar o despacho de potência ativa e reativa dos geradores e maximizar critérios de segurança baseados nos níveis de tensão dos barramentos. Em (YOKOYAMA et al., 1988) é proposta uma abordagem multiobjetivo para o planejamento de sistemas de potência utilizando a abordagem  $\varepsilon$ -restrito descrita anteriormente. Em (LI; VENKATASUBRAMANIAN, 2004) é proposto um método para a maximização da transferência de potência entre diferentes áreas do sistema de potência da Califórnia, considerando a análise multiobjetivo do problema.

Em 1999, Momoh e Zhu analisaram a solução do problema de FPO multiobjetivo não-linear através do método de pontos interiores (MOMOH; ZHU, 1999). O problema considera três diferentes funções objetivos: minimização do custo da geração de potência ativa, planejamento de reativos e minimização das perdas no sistema.

Métodos heurísticos foram também empregados na resolução do problema FPO multiobjetivo com variáveis reais. Em (AMORIM et al., 2009) primeiramente o problema FPO é decomposto em diversos subproblemas distintos, criando no sistema diferentes áreas independentes. As restrições inicialmente impostas ao problema original são transformadas em funções objetivo. O critério otimizado é obter o despacho ótimo de potência ativa e reativa para cada área do sistema, de forma que não haja interferência nas áreas vizinhas. Uma vez que o problema original é decomposto em uma série de subproblemas, um algoritmo evolucionário multiobjetivo é proposto. Em (MAROUANI et al., 2009) é proposto uma metodologia baseada em algoritmos evolucionários



para o problema de despacho de potência reativa, considerando a presença do equipamento FACTS do tipo UPFC no sistema. O processo é multiobjetivo, pois simultaneamente é minimizado dois critérios, as perdas nas linhas de transmissão e o desvio das tensões em relação a um valor estabelecido.

### **3.4.5 Adequação dos Algoritmos de Resolução**

Os problemas multiobjetivo podem ser classificados como lineares ou não lineares, sendo que nesta última classificação se encontram os problemas convexos ou não convexos. Podem ser definidos também em termos de variáveis reais, variáveis inteiras ou ambos os tipos de variáveis. Obviamente os algoritmos de solução empregados internamente pelos métodos de otimização multiobjetivo descritos anteriormente devem ser apropriados para os problemas resultantes. Assim, devem ser usados métodos de otimização linear, não linear (não convexa se for o caso), otimização inteira ou inteira-mista. Conforme discutido no Capítulo 2, o problema que se quer resolver é multiobjetivo, não convexo e inteiro-misto. O uso de metaheurísticas para a resolução deste tipo de problema tem se mostrado promissor.

## **3.5 Problemas de Otimização Combinatória**

Conforme (MURTY, 1976) otimização combinatória é um estudo matemático que visa encontrar uma seleção ótima de variáveis discretas que otimize uma função objetivo. O problema do Caixeiro Viajante é um dos mais tradicionais e difundidos problemas de otimização combinatória (MURTY, 1976). Na área de estudos sobre sistemas elétricos de potência podem ser encontrados vários problemas de planejamento da expansão e operação que são combinatórios. Por exemplo:

- Planejamento da expansão da rede de transmissão ou distribuição; Planejamento de Reativos - escolha de locais para inserção de fontes de

reativos;

- Determinação das Unidades de Geração em operação (Problema do Unit Commitment e Problema de Coordenação Hidrotérmica);
- Problema de escalonamento de manutenção de equipamentos e
- Determinação da operação ótima de equipamentos com variação discreta (bancos de capacitores/reatores, taps de transformadores de tensão).

### 3.5.1 *Características Principais, Métodos de Solução e Aplicações*

Grande parte dos problemas de otimização combinatória pertencem à classe de problemas não-polinomiais completos (NP-Completo), ou seja, para esses problemas não existem algoritmos polinomiais conhecidos que encontrem as soluções ótimas em tempo computacional aceitável. Atualmente, problemas combinatórios com restrições e função objetivo lineares podem ser resolvidos de maneira eficiente por métodos analíticos. Entretanto, problemas não lineares são ainda um desafio. Os métodos empregados na resolução desses problemas podem ser classificados em três categorias:

- Métodos analíticos
- Métodos Heurísticos
- Metaheurísticas

Entre os métodos analíticos podem ser citados: o Algoritmo de Branch&Bound e suas variações; o Método de Benders, o Método dos Planos de Corte e o Método dos Feixes, entre outros. Esses métodos possuem uma formulação matemática bem estruturada e se baseiam em propriedades matemáticas dos problemas aos quais são aplicados (convexidade, por exemplo).

Existem inúmeros problemas de aplicações práticas cujas soluções ainda não são conhecidas ou são extremamente difíceis de obter. Esses problemas são frequentemente temas de estudos com métodos heurísticos. Heurísticas foram desenvolvidas para determinar, senão a solução ótima, soluções de qualidade suficiente para serem utilizadas, explorando de forma inteligente o espaço de busca. Elas são desenvolvidas especificamente para o problema que se deseja resolver.

Por outro lado, Metaheurísticas são algoritmos aproximados que tentam combinar métodos heurísticos com técnicas avançadas de exploração do espaço de busca. Segundo (BLUM; ROLI, 2003), metaheurísticas são:

*“Estratégias com o objetivo de guiar o processo de busca, realizando uma exploração eficiente do espaço de soluções, e incorporando mecanismos para evitar que o algoritmo fique preso em alguma região específica desse espaço.”*

Metaheurísticas são estratégias genéricas que podem ser aplicadas a qualquer problema. Destacam-se como as principais metaheurísticas as seguintes técnicas:

- Recozimento Simulado
- Busca Tabu
- Redes Neurais
- Colônia de Formigas
- Nuvem de Partículas
- Computação Evolucionária

Heurísticas e metaheurísticas são importantes quando não existe um método exato de solução ou quando o modelo aplicado ao problema requer uma complexidade computacional muito grande. A grande vantagem é a

simplicidade na abordagem e a flexibilidade, que permite que sejam adaptadas ao problema em questão. No entanto, são fortemente dependentes dos parâmetros iniciais e, em alguns casos, a qualidade da solução obtida é desconhecida.

Há, na literatura, vários trabalhos que descrevem o desempenho de metaheurísticas na resolução de problemas encontrados na área de sistemas elétricos de potência. Algumas aplicações recentes são relacionadas a seguir.

Várias metaheurísticas foram utilizadas na resolução dos problemas de planejamento da expansão da transmissão e distribuição. No planejamento do sistema de transmissão podem ser citados os trabalhos desenvolvidos pelos pesquisadores da UNICAMP e UNESP/Ilha Solteira (ROMERO; GALLEG0; MONTICELLI, 1996; ROCHA, 2004). A metaheurística Nuvem de Partículas foi utilizada para resolver uma formulação desse problema considerando estocasticidade (LIU et al., 2006). Em (GANDOMKAR; VAKILIAN; EHSAN, 2005) é explorado o uso de recozimento simulado combinado com Algoritmos Genéticos para fornecer uma alocação ótima da geração distribuída no sistema de distribuição.

Várias outras aplicações de metaheurísticas a problemas relacionados com o sistema de distribuição podem ser encontradas. Em (MORI; GOTO, 2000) o problema de alocação ótima de capacitores no sistema de distribuição é analisado utilizando a heurística Busca Tabu. Em (RAMEZANI et al., 2005) é proposto um modelo baseado em redes neurais artificiais capaz de realizar a previsão de demanda de potência ativa e reativa. Em (LAZZARETTI et al., 2009) é apresentado um método para classificação automática de falhas e eventos relacionados com a qualidade de serviço em redes de distribuição. Faz-se um pré-processamento de oscilografias e, em seguida, uma classificação das falhas utilizando Redes Neurais. Também utilizando Redes Neurais, destacam-se os trabalhos dos pesquisadores da UFSC e UFPR no diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão (CARDOSO G.; ROLIM; ZURN, 2004).

Podem ser encontradas também aplicações na área de controle em sistemas de potência, determinação de parâmetros ótimos de estabilizadores em sistema de potência (PSS) (ABIDO, 2002; DOTTA; SILVA; DECKER, 2009).

Além dos trabalhos citados, a partir da década de 1990, várias aplicações de metaheurísticas foram feitas em problemas encontrados na área de sistemas de potência e em diversas outras áreas de pesquisa. Entre as metaheurísticas, técnicas de Computação Evolucionária são algumas das mais utilizadas e uma dessas técnicas, o Algoritmo Genético, é empregada neste trabalho.

Algoritmos Genéticos foram utilizados como técnica otimização para solução do problema de alocação de medidores e remotas para estimação de estados ??.

### 3.6 Computação Evolucionária

A palavra *Computação Evolucionária* é frequentemente utilizada para caracterizar uma classe de algoritmos baseados no mecanismo de evolução. Sua essência está centrada na teoria Darwinista e, portanto, está baseada nos mecanismos de seleção natural das espécies (HOLLAND, 1992). Nesse contexto, há na literatura várias técnicas, entre elas: os Algoritmos Genéticos (AGs), Programação Evolutiva, Estratégia Evolutiva e Programação Genética. Embora com algumas diferenças pontuais, todas essas técnicas estão centradas no mecanismo de evolução e, portanto, envolvem seleção, mutação e cruzamento.

Algoritmos Evolucionários diferem completamente das técnicas tradicionais de otimização, pois não fazem uso de derivadas. Assim, resolvem problemas descontínuos sem apresentar dificuldade de convergência. Entretanto, por serem baseados em um processo probabilístico, os Algoritmos Evolucionários são fortemente dependentes de seus parâmetros. A escolha, por exemplo, do tamanho da população inicial, bem como o número de gerações

para a convergência, pode alterar completamente o resultado final. A convergência para um ótimo local está entre os principais problemas atrelados com as condições iniciais. Portanto, uma boa estruturação do problema, aliado à adequada definição dos parâmetros internos do algoritmo é de fundamental importância.

Entre os algoritmos evolucionários, destacam-se os Algoritmos Genéticos (AGs). Desenvolvido por *John Holland* na universidade de Michigan em meados de 1975, os (AGs) são técnicas que tentam emular o processo de adaptação artificialmente (GOLDBERG, 1989). A partir dos trabalhos de Holland os AGs se estabeleceram como uma técnica eficaz e confiável na soluções de problemas de otimização.

Algoritmos Genéticos podem ser definidos como (GREFENSTETTE, 1986):

*“Um procedimento iterativo que mantém uma população de estruturas, chamadas de indivíduos ou soluções, que representam possíveis soluções de um problema. A cada incremento (chamada geração), os indivíduos na população atual são avaliados de acordo com sua aptidão para a solução do problema. Tendo como base essa avaliação, uma nova população de soluções candidatas é formada, utilizando-se os operadores genéticos específicos, tais como cruzamento e mutação.”*

Os AGs têm sido aplicados atualmente numa grande variedade de problemas. Entre os principais fatores que têm contribuído para a popularidade dos AG na eficácia na solução de problemas destacam-se:

- Simplicidade de operação;
- Facilidade de implementação;
- Eficácia na busca da região onde, provavelmente, encontra-se o máximo ou mínimo global, dependendo do problema;

- Aplicável em situações onde não se conhece o modelo matemático ou este é impreciso.

### **3.6.1 Fundamentos Biológicos**

Amplamente debatida em cursos de Biologia, adaptação significa qualquer processo pelo qual uma determinada estrutura é constantemente alterada para se obter um melhor desempenho. O objetivo principal é atribuir à essa estrutura algumas características importantes de modo que o processo de evolução se torne evidente.

Os organismos vivos são constituídos de células, todas contendo um mesmo conjunto de cromossomos. Cromossomos são considerados cadeias de DNA e servem como modelo para todo o organismo. Cada cromossomo é um determinado número de genes, pequenos blocos de DNA, cuja função é codificar determinadas características do DNA. O conjunto completo de material genético (todos os cromossomos) é chamado genoma. Um conjunto particular de genes de um genoma é chamado genótipo, sendo a base para o fenótipo do organismo, que são suas características físicas e mentais, tais como: cor dos olhos, inteligência, etc.

### **3.6.2 Descrição dos AGs**

Os AGs não trabalham sobre o domínio do problema, mas sim sobre representações codificadas de seus elementos. Tal fator impõe ao seu uso uma restrição: para resolver um problema é necessário que o conjunto de soluções viáveis para este possa ser de alguma forma codificado em uma população de indivíduos. Cada indivíduo da população é tratado como um cromossomo, ou seja, uma cadeia de números que representa uma solução factível para o problema.

O processo iterativo de um Algoritmo Genético é apresentado na Figura 17. A formação da população inicial é o primeiro passo do processo,

sendo, portanto, considerada de fundamental importância para a obtenção de resultados satisfatórios. Uma população de tamanho adequado e bem diversificada aumenta as chances de eficiência do processo. Tal população consiste na obtenção, na maioria dos casos aleatoriamente, de  $n_{ind}$  cromossomos, cada um representando uma solução factível do problema. É sobre essa população que serão aplicadas as próximas etapas do processo.

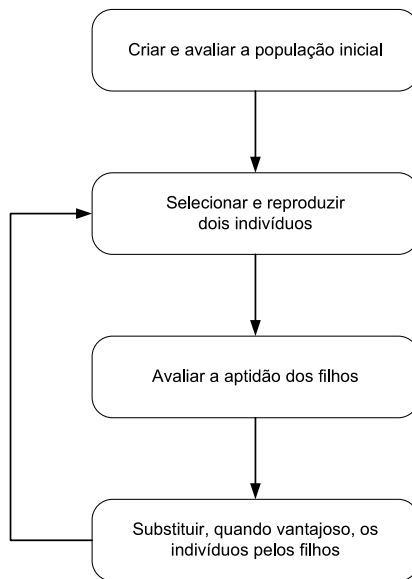


Figura 17: Mecanismo do AG

Após a codificação do problema e a obtenção da população inicial, faz-se necessário a definição da função aptidão utilizada, pois essa função será a única informação utilizada no processo iterativo, sendo crucial para a aplicação dos princípios de seleção, reprodução e mutação. Seu papel é fazer uma avaliação da qualidade das soluções, introduzindo algo como uma função objetivo em otimização clássica. É baseado na função aptidão que os



indivíduos serão selecionados para se reproduzirem.

A aplicação dos operadores genéticos é a última etapa do processo iterativo. Os indivíduos são selecionados, segundo um critério previamente definido, e sobre eles são aplicados o operadores cruzamento e mutação. Com isso, são introduzidos novas soluções ao problema e, portanto, novamente os indivíduos são selecionados.

O processo iterativo é repetido durante  $n_{ger}$  gerações e por fim uma solução que maximize ou minimize a função objetivo é obtida. Com o objetivo de detalhar as principais etapas dos AGs, a seguir são descritos os principais operadores genéticos utilizados, entre eles a seleção, o cruzamento e a mutação.

### 3.6.3 Seleção

O principal objetivo da seleção é escolher os indivíduos que tenham as melhores características para participarem do processo de reprodução. Assim, os gens dos indivíduos considerados bons são passados para a próxima geração. Basicamente, cada indivíduo tem uma chance para reproduzir proporcional à sua aptidão, ou seja, um indivíduo que possua uma maior aptidão terá maiores chances de ser selecionado para reproduzir do que outro que tenha menor, porém todos possuem chance de cruzamento, mesmo que seja pequena. Existem diversos métodos para seleção, entre eles:

- *Seleção por ranking*: os indivíduos da população são ordenados de acordo com seu valor de aptidão e então sua probabilidade de escolha é atribuída conforme a posição que ocupam.
- *Seleção pelo método da roleta (roulette wheel selection)*: Primeiramente ordenam-se os indivíduos de acordo com suas aptidões, do mais apto ao menos apto. Em seguida calcula-se o somatório das aptidões ( $f_{tot}$ ) e seleciona-se um número aleatório,  $\eta$ , com distribuição uni-

forme no intervalo  $[0, f_{tot}]$ . Por fim, percorre-se a lista ordenada de indivíduos somando-se as correspondentes aptidões e comparando essa soma com  $\eta$ . A posição da lista ordenada em que tal soma é maior ou igual a  $\eta$  indica o indivíduo selecionado.

- *Seleção por torneio (tournament selection)*: Grupos de soluções ou somente um par de soluções são escolhidos aleatoriamente e competem entre si. A solução com melhor função aptidão é selecionada.

#### 3.6.4 Cruzamento

A fase do cruzamento em um AG é sempre posterior a seleção dos indivíduos. Ocorre a troca de gens entre pares de cromossomos selecionados para originar os novos indivíduos, os quais poderão formar a geração seguinte. Assim, a ideia principal do cruzamento é propagar as características positivas dos indivíduos mais aptos da população por meio da troca de gens entre os mesmos, originando novos indivíduos. Existem três maneiras de se realizar os cruzamentos:

- *Ponto Único*: Neste método, é escolhido um ponto de corte e a partir desse ponto o material genético dos pais é trocado. Tal operação dá origem a dois novos cromossomos, que podem ou não serem factíveis, formados pela combinação das características genéticas dos pais.
- *Ponto Duplo*: Neste método são escolhidos dois pontos de cruzamento e a partir desses os materiais genéticos dos pais são trocados de forma intercalada. Por haver maior troca de material genético entre os cromossomos, o cruzamento de ponto duplo é mais utilizado.
- *Pontos Aleatórios*:

Esse tipo de cruzamento utiliza pontos aleatórios para a troca de material genético.

### **3.6.5 Mutação**

O operador mutação tem por objetivo realizar, de maneira aleatória, modificações em determinados gens de uma população. Tal operação é importante, pois possibilita obter propriedades genéticas que se perderam ao longo das gerações ou são encontradas em baixa porcentagem. Pode-se, por exemplo, durante o processo de cruzamento perder alguma característica do problema (gen). Desta forma, a aplicação operador de mutação mostra-se indispensável, uma vez que permite a manutenção da diversidade genética da população.

Vale ressaltar que a taxa de mutação deve acometer uma pequena parcela da população, pois caso o percentual seja elevado, os indivíduos gerados pouco se assemelharão aos seus pais. Por outro lado, caso forem usadas taxas de mutação excessivamente pequenas, a diversidade da população estará comprometida.

### **3.6.6 Atualização**

Na forma mais simples de atualização, a população é completamente substituída, ou seja, os cromossomos resultantes do processo de cruzamento (filhos) substituem os originais. Além disso o tamanho da população é mantido fixo ao longo das gerações. Existem, porém, outras abordagens: o número de indivíduos gerados pode ser menor, o tamanho da população pode sofrer variações e o critério de inserção pode ser variado. Por exemplo, os filhos somente substituem os pais se por acaso o valor da função aptidão dos filhos forem menores que a dos pais.

## **3.7 Conclusões**

Neste capítulo foram apresentado os conceitos envolvidos com otimização multiobjetivo inteiro-mista. Primeiramente, foi apresentado o

conceito da fronteira de Pareto e um exemplo aplicado a sistemas de potência foi detalhado, no qual foi possível exemplificar a obtenção da fronteira de eficiência para dois objetivos conflitantes. Em seguida, foram abordadas diversas características de problemas com variáveis inteiras e foram apresentadas as técnicas usadas na sua resolução.

Na sequência será detalhado o Algoritmo Genético Multiobjetivo (AGMO) desenvolvido para a alocação de equipamentos FACTS no sistema de potência.

## **4 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO (AGMO)**

### **4.1 Considerações Iniciais**

Neste capítulo será detalhada a metodologia desenvolvida para alocação ótima de equipamentos FACTS em sistemas de potência. Será apresentado o Algoritmo Genético Multiobjetivo (AGMO) desenvolvido. A codificação do problema é detalhada e os operadores genéticos seleção, cruzamento e mutação são apresentados. Também é apresentado os detalhes da obtenção da população inicial do problema, bem como o critério de convergência da metodologia desenvolvida. A questão da preservação da diversidade de soluções na fronteira de Pareto é discutida e é apresentada a técnica de fitness sharing, utilizada para melhorar a diversidade das soluções obtidas. Por fim, é mostrado o algoritmo para solução do problema.

### **4.2 O Problema a ser Resolvido**

Conforme apresentado e discutido no Capítulo 2, a alocação ótima de FACTS em sistemas de potência caracteriza-se como sendo um problema de otimização combinatória e, portanto, métodos analíticos tradicionais apresentam certas dificuldades na obtenção de soluções. Além disso, algumas das restrições de igualdade e desigualdade impostas pela modelagem do problema são não-lineares, ampliando a dificuldade de solução.

Uma vez que o processo de otimização visa a obtenção de soluções que otimizem simultaneamente dois objetivos distintos, o problema é caracterizado como multiobjetivo, o que requer a consideração da fronteira de Pareto como solução do problema bem como a introdução de mecanismos para a preservação da diversidade populacional. Neste trabalho optou-se pela utilização da metaheurística Algoritmos Genéticos Multiobjetivo (AGMO) para obtenção da solução da alocação ótima dos equipamentos SVC e TCSC.

A diferença crucial entre um Algoritmo Genético Multiobjetivo e um Algoritmo Genético Monobjetivo está na forma como é atribuído o nível de aptidão às soluções. Devido à indiferença existente entre as soluções dominadas de um problema multiobjetivo, é necessário definir estratégias para calcular o fitness das soluções. No entanto, o procedimento do AGMO é basicamente o mesmo do AG e pode ser dividido em quatro etapas principais:

1. Criar e avaliar a população inicial: primeira etapa que consiste em definir soluções iniciais para o problema;
2. Selecionar e reproduzir os indivíduos: através das operações genéticas, os indivíduos se reproduzem;
3. Avaliar a aptidão da população: considerando a reprodução dos indivíduos, a nova população deve ser avaliada;
4. Substituir, quando vantajoso, indivíduos e, caso o número de gerações (*nger*) não seja atingido, voltar para o passo 2. Do contrário, encerrar o processo.

Seja nas abordagens multiobjetivo ou monobjetivo, os AGs não trabalham sobre o domínio do problema (soluções), mas sim sobre representações codificadas de seus elementos. Portanto, a codificação do problema é extremamente importante. Suas características são apresentadas a seguir.

#### **4.2.1 Codificação**

A codificação do problema em análise é considerado um ponto crítico do processo. Uma codificação confiável garante, em certos casos, a excelência na solução do problema. A codificação do problema passa, obrigatoriamente, pela codificação do cromossomo, pois é este que vai introduzir as opções de local de instalação do FACTS, tipo do equipamento e capaci-

dade operacional. A Figura 18 apresenta a estrutura básica dos três primeiros conjuntos de gens do cromossomo.

$local_1 \dots local_{n_{facts}}$	$tipo_1 \dots tipo_{n_{facts}}$	$r_1 \dots r_{n_{facts}}$
-----------------------------------	---------------------------------	---------------------------

Figura 18: Estrutura simplificada do Cromossomo

As três subdivisões do cromossomo da Figura 18 possuem  $n_{facts}$  gens, sendo  $n_{facts}$  o número de equipamentos instalados. A primeira subdivisão faz referência à localização do equipamento no sistema de potência, através da identificação da linha no qual o equipamento FACTS é instalado. Quando o AG informa a linha contendo o equipamento SVC, há um sorteio entre as duas barras terminais para definir em qual o equipamento será instalado.

A segunda subdivisão do cromossomo informa o tipo de equipamento (SVC ou TCSC) que a solução está considerando. Por definição, se o tipo do FACTS for igual a 1 a solução contém o equipamento FACTS do tipo SVC e se o tipo for igual a 2 a solução contém um FACTS do tipo TCSC. Ressalta-se a possibilidade de uma solução conter FACTS do mesmo tipo, porém com capacidades diferentes. Por exemplo, pode-se obter uma solução contendo dois equipamentos FACTS do tipo SVC, porém em barras diferentes. No entanto, quando a solução representa a inserção de equipamentos do mesmo tipo no mesmo local, esta é automaticamente descartada e outra solução é obtida.

Por fim, a última subdivisão do cromossomo representa a variável  $r_i$  associada a cada equipamento. Usada para definir a capacidade do equipamento,  $r_i$  é uma variável aleatória com distribuição uniforme entre 0 e 1. A capacidade do SVC é definida limitando-se sua susceptância:

$$b_i^{\min} = -r_i T \quad b_i^{\max} = r_i T \quad (4.1)$$

onde  $T$  representa a potência reativa máxima do SVC considerado. A capacidade do TCSC é definida limitando-se a reatância total da linha compensada:

$$x_l^{\min} = \frac{1}{2} (-r_i x_i^0) \quad x_l^{\max} = \frac{1}{2} (r_i x_i^0) \quad (4.2)$$

A estrutura completa do cromossomo é mostrada na Figura 19. Nele estão também os valores de  $F_t$  e  $F_e$ , o *rank* e o valor da aptidão compartilhada (*fitness sharing*) da solução. Os gens *rank* e *fitness sharing* são referentes ao processo de otimização multiobjetivo, apresentado nas próximas seções.

$local_1 \dots local_{n_{facts}}$	$tipo_1 \dots tipo_{n_{facts}}$	$r_1 \dots r_{n_{facts}}$	$F_t$	$F_e$	<i>rank</i>	<i>fitness sharing</i>
-----------------------------------	---------------------------------	---------------------------	-------	-------	-------------	------------------------

Figura 19: Estrutura completa do cromossomo

Nota-se que a codificação utilizada nesse trabalho é baseada em número reais, diferente de grande parte das aplicações dos AGs que usam números binários para codificar o problema. Isso se deve ao fato de que a informação necessária para a identificação do local de inserção do FACTS no sistema pode ser diretamente inserida no cromossomo sem nenhuma codificação adicional.

Ressalta-se ainda que no presente trabalho o número de equipamentos FACTS ( $n_{facts}$ ) é considerado um dado de entrada do algoritmo, não sendo, portanto, uma variável de controle ao longo do processo de otimização. Em outras palavras, significa que não há a possibilidade de otimizar o número de equipamentos FACTS aplicados ao sistema.

#### 4.2.2 População Inicial

A geração da população inicial é o primeiro passo dentro de um AG. A população é composta por um conjunto de *nind* cromossomos, sendo cada um uma solução factível do problema. É sobre essa população que serão aplica-



das as próximas etapas do processo. Dependendo do problema, tal tarefa não é das mais complicadas, pois basta gerar, na maioria dos casos aleatoriamente,  $n$  soluções factíveis para o problema e agrupá-las. Esse procedimento ajuda a garantir maior diversidade. Porém, em alguns casos específicos, devido às características do conjunto de soluções factíveis do problema, a geração da população inicial pode ser resultado da aplicação de outras metodologias.

O número de elementos da população inicial depende de cada problema. Quanto maior o número de indivíduos na população ( $n_{ind}$ ) maior é a probabilidade de convergência. Porém, o tempo computacional dispendido para a solução do problema aumenta. Por outro lado, no caso de uma população inicial pequena, pode ocorrer a perda da diversidade, ou seja, somente uma parcela do espaço de busca é avaliada. Com isso, a probabilidade de se alcançar ótimos locais como solução do problema aumenta. A escolha do tamanho da população inicial está amplamente relacionada com o sistema em análise, não havendo, portanto, definições prévias que garantam a obtenção de resultados ótimos.

No presente trabalho a população inicial é obtida seguindo os seguintes passos:

- **Determinação do Local, Tipo e Capacidade do FACTS:** Primeiramente, os locais de inserção do equipamento FACTS são definidos e o cromossomo é então definido;
- **Determinação da Factibilidade da solução:** Através da execução do FPO, é possível garantir que todas as restrições impostas ao problema são satisfeitas e, com isso, tem-se a garantia de que a opção de instalação do equipamento é de fato uma solução para o problema;
- **Cálculo das funções técnica e econômica:** Uma vez que se tem a garantia de factibilidade da solução, as funções técnicas e econômica são então determinadas;

Repete-se esse procedimento para *nind* diferentes soluções e a população inicial do problema é obtida. Tal população é base do problema, pois são os indivíduos presentes na população inicial que darão início ao processo iterativo.

Na obtenção da população inicial, pode acontecer que a indicação inicial de local de inserção dos equipamentos FACTS leve à infactibilidade, seja por problema de não convergência do FPO - no caso de alguma restrição específica não poder ser atendida - seja por problema na representação dos indivíduos - no caso da solução representar a inserção de mais de um equipamento FACTS no mesmo local. Em ambos os casos, a solução gerada é descartada e uma nova solução é obtida seguindo as etapas descritas anteriormente.

#### **4.2.3 Critério de Convergência**

Existem várias maneiras de analisar a convergência de um algoritmo genético. A mais tradicional considera um número máximo de gerações (*nger*) como parâmetro informado pelo usuário. Assim, são realizadas *nger* gerações e, no caso de um algoritmo genético monobjetivo, o melhor indivíduo é selecionado. No caso de um algoritmo genético multobjetivo, após (*nger*) gerações são obtidos como solução para o problema os indivíduos presentes na fronteira de eficiência do problema, uma vez que esses são todos ótimos do ponto de vista de Pareto.

Algumas abordagens se baseiam no comportamento da função aptidão: quando esta função não se altera após um dado número de iterações, o processo de otimização é considerado convergido e, portanto, o processo deve ser encerrado.

Neste trabalho, entretanto, o critério de convergência adotado é o número máximo de gerações (*nger*), sendo este fixo ao longo do processo iterativo. Ressalta-se que, como será apresentado no capítulo de resultados,

pode-se variar o número de gerações do problema para avaliar a convergência do AG e analisar as soluções apresentadas.

#### 4.2.4 Função Aptidão Multiobjetivo

Em um AG convencional, a seleção das soluções pais, que se reproduzirão, é feita de acordo com a função aptidão das soluções na população atual. Em otimização monobjetivo a função aptidão e a função objetivo do problema geralmente coincidem, ou em alguns casos, a primeira é uma variação ou modificação da segunda. Entretanto, em otimização multiobjetivo, os objetivos são considerados separadamente, sendo necessário definir critérios adequados para calcular o fitness de cada indivíduo.

Em (GOLDBERG, 1989) é sugerido o uso do conceito de dominância de Pareto para calcular o fitness das soluções. O livro apresenta um procedimento iterativo denominado ranking (ordenação). Neste, inicialmente, atribui-se às soluções dominantes da população um valor  $rank = 1$ . Desconsiderando temporariamente essas soluções, determinam-se as novas soluções dominantes da população restante para atribuir-lhes  $rank = 2$ . Esse procedimento continua até que toda a população seja classificada. O  $rank$  de uma solução determina a qualidade da solução obtida, baseando-se na fronteira de Pareto do problema. Note-se que as melhores soluções possuirão menor  $rank$  e que a função aptidão de uma solução particular depende da relação de dominância entre essa e as outras soluções. Esta ideia de utilização do conceito de dominância de Pareto para o cálculo de aptidão tem sido muito utilizada em várias implementações de algoritmos genéticos multiobjetivo (ARROYO, 2002). Matematicamente, o  $rank$  do indivíduo  $i$  na geração  $t$  é calculado como sendo:

$$r_i^{(t)} = 1 + p_i^{(t)} \quad (4.3)$$

onde  $p_i^{(t)}$  representa o número de indivíduos da geração  $t$  que dominam o

indivíduo  $i$  e  $r_i^t$  determina o *rank* do indivíduo  $i$  na geração  $t$ . Assim, todos os indivíduos não-dominados na geração  $t$  possuem *rank* = 1. A Figura 20 apresenta um exemplo do processo de atribuição de  $r_i^{(t)}$  para os indivíduos. Nela, pode-se observar uma população fictícia formada por 8 indivíduos, ou seja, 8 diferentes soluções para um determinado problema. Percebe-se que os indivíduos destacados com o número 1, identificam os que pertencem a fronteira de eficiência do problema, uma vez que não há outros indivíduos na população que os dominem. Se por ventura fosse necessário informar, baseado na figura, uma solução para o problema, seriam esses indivíduos (representados pelo número 1) os que formariam o conjunto de soluções para o problema.

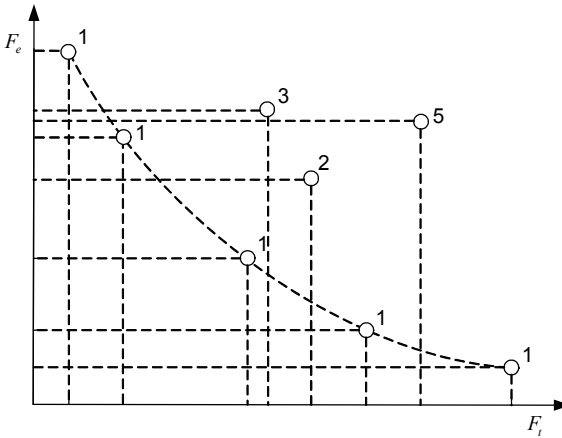


Figura 20: Rank dos indivíduos

Tendo como base o rank dos indivíduos, é estabelecido um valor de aptidão para cada solução do problema (DEB; KALYANMOY, 2001). A função aptidão é dada por:

$$f_i^{(t)} = N - \sum_{k=1}^{r_i^{(t)}-1} \mu(k) - 0,5 \left( \mu(r_i^{(t)}) - 1 \right) \quad (4.4)$$

onde  $f_i^{(t)}$  é a nova função aptidão do indivíduo,  $r_i$  é o rank do indivíduo  $i$ ,  $\mu(r_i)$  é o número de soluções com rank  $r_i$ ,  $\mu(k)$  é o número de soluções com rank  $k$  e  $N$  é o número de indivíduos.

#### 4.2.5 Preservação da Diversidade

Em um AG monobjetivo, a população tende a convergir para uma única solução (ótimo global do problema). Este comportamento pode ser aceitável quando a ideia é encontrar uma única solução ótima ou uma aproximação a esta. No entanto, em otimização multiobjetivo, se a preservação da diversidade da população não é considerada, o conjunto de soluções ótimas pode convergir a regiões limitadas do conjunto Pareto-ótimo. Isso significa que há, no conjunto Pareto-ótimo, um número muito maior de soluções que, teoricamente, seriam soluções factíveis para o problema. Portanto, manter a diversidade da população é crucial para encontrar um conjunto de soluções não dominadas cuja localização na fronteira de Pareto esteja bem distribuída.

Estratégias de diversificação buscam obter soluções bem distribuídas ao longo da fronteira de eficiência. A ideia central dessas estratégias é dividir a população em diferentes sub-populações (nichos) de acordo com a proximidade das soluções. Em 1987, Goldberg e Richardson (GOLDBERG; RICHARDSON, 1987) introduziram o conceito de diversidade em um algoritmo genético. A ideia é penalizar as soluções que possuem funções aptidão muito semelhantes. Com isso, o grupo de soluções semelhantes passa a possuir probabilidade menor de seleção nas gerações seguintes e com isso diversifica a população.

Na literatura, foram desenvolvidas algumas técnicas para manter a di-

versidade da população, entre elas a técnica de *fitness sharing*, detalhada a seguir.

#### 4.2.5.1 Fitness Sharing

Na técnica de *fitness sharing* a proximidade de duas soluções  $i$  e  $j$  é quantificada pela distância Euclidiana entre elas, calculada no espaço objetivo:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^M \left( \frac{F_{k,i} - F_{k,j}}{F_k^{(\max)} - F_k^{(\min)}} \right)^2} \quad (4.5)$$

onde  $F_k^{(\max)}$  e  $F_k^{(\min)}$  são os valores máximo e mínimo da  $k$ -ésima função objetivo, respectivamente,  $F_{k,i}$  e  $F_{k,j}$  são os valores da função objetivo  $k$  para os indivíduos  $i$  e  $j$ , respectivamente, e  $M$  é o número de objetivos.

A técnica *fitness sharing* degrada as funções de aptidão de soluções que pertencem a um mesmo nicho, criando uma aptidão compartilhada

$$f_{sh} = \frac{f_i}{m_i} \quad (4.6)$$

sendo o fator de degradação,  $m_i$ , definido como

$$m_i = \sum_{j=1}^N Sh(d_{ij}) \quad (4.7)$$

onde  $N$  o número de indivíduos no nicho e a função  $Sh(d_{i,j})$  é expressa

$$Sh(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left( \frac{d_{ij}}{\sigma_{share}} \right)^\alpha & \text{se } d_{i,j} \leq \sigma_{share} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.8)$$

sendo  $\sigma_{share}$  e  $\alpha$  parâmetros do problema.

Analisando (4.8) observa-se que, se não houver nenhuma solução a uma distância menor do que  $\sigma_{share}$  do indivíduo  $i$ ,  $m_i = 1$  e  $f_i$  não é modifi-

cada. Por outro lado, quanto maior o número de indivíduos próximos a  $i$  (com distâncias menores do que  $\sigma_{share}$ ), maior é  $m_i$ , ou ainda, mais degradada é  $f_i$ . Portanto, o *fitness sharing* atua através da redução da função aptidão de cada indivíduo da sub-população por um fator proporcional à quantidade de indivíduos similares, ou ainda, de acordo com o número de indivíduos no nicho definido pelo raio  $\sigma_{share}$ . Consequentemente, há a redução da probabilidade de tais indivíduos serem selecionados para a operação de cruzamento nas gerações posteriores e a diversificação da população é obtida. Graficamente, esse processo é apresentado na Figura 21.

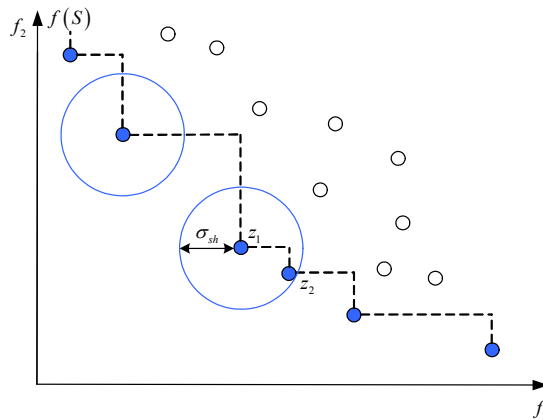


Figura 21: *Fitness sharing* dos indivíduos

Note que na sub-população de pontos  $f(S)$ , o fitness inicial das soluções representadas pelos pontos  $z_1$  e  $z_2$  é reduzido, pois para o raio  $d_{sh}$  aplicado, a distância entre os indivíduos  $z_1$  e  $z_2$  é menor que a distância do raio  $\sigma_{sh}$  adotado.

Esta técnica de diversificação foi usada em várias implementações de algoritmos genéticos da literatura (ARROYO, 2002). O valor do parâmetro  $f_{sh}$  influencia diretamente a convergência do AG, e por este motivo em (GOLD-

BERG, 1989) e (FONSECA; FLEMING, 1993) sugerem métodos para calcular este parâmetro. Porém, frequentemente  $\sigma_{sh} = 0,5$  é considerado um valor padrão.

A definição do operador *fitness sharing* completa as informações presentes na codificação do problema, apresentado na Figura 19. É com base nas informações contidas no cromossomo do problema que os operadores genéticos serão aplicados. Os operadores genéticos seleção, cruzamento e mutação são detalhados na sequência.

## 4.2.6 Operadores Genéticos

### 4.2.6.1 Seleção

Cada nova população é obtida da seguinte maneira: 50% dos mais aptos são repassados diretamente para a nova população e o restante é obtido usando o processo de cruzamento, mantendo o número de indivíduos na população constante. Para definir os indivíduos que participarão do processo de cruzamento, emprega-se a técnica de Seleção por Roleta (DEB; KALYANMOY, 2001). Primeiramente ordenam-se os indivíduos de acordo com suas aptidões, do mais apto ao menos apto. Em seguida calcula-se o somatório das aptidões ( $f_{tot}$ ) e seleciona-se um número aleatório,  $\eta$  com distribuição uniforme no intervalo  $[0, f_{tot}]$ . Por fim, percorre-se a lista ordenada de indivíduos somando-se as correspondentes aptidões e comparando essa soma com  $\eta$ . A posição da lista ordenada em que tal soma é maior ou igual a  $\eta$  corresponde à posição do indivíduo selecionado.

### 4.2.6.2 Cruzamento e Mutação

A ideia principal do cruzamento é propagar as características positivas dos indivíduos mais aptos da população por meio da troca de gens entre os mesmos, originando novos indivíduos. Neste trabalho são escolhidos dois pontos de cruzamento e, a partir desses, os materiais genéticos dos pais são trocados de forma intercalada, como pode ser observado na Figura 22, na



qual é apresentado o exemplo de alocação de quatro equipamentos FACTS. Os pontos de cruzamento escolhidos de maneira aleatória, sendo diferentes a cada operação de cruzamento.

Convém ressaltar que após a determinação dos cromossomos filhos, a factibilidade desses é analisada através da execução de um FPO. Se por ventura venha-se a constatar que o indivíduo gerado pelo operador cruzamento não é factível, esse indivíduo é automaticamente descartado.

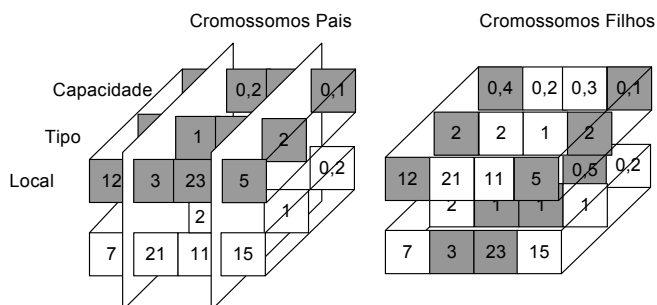


Figura 22: Cruzamento de ponto duplo

O maneira de realizar o cruzamento apresentado na Figura 22 é válido quando são considerados dois ou mais equipamento FACTS. No entanto, quando é considerado apenas um único equipamento, a forma de efetuar o cruzamento é alterada, conforme pode ser verificado na Figura 23. No processo de cruzamento, o ponto de cruzamento dos cromossomos pais, indicados por  $P1$  e  $P2$ , são mantidos constantes e a troca de material genético ocorre como apresentado na figura. O cromossomo filho ( $F1$ ) é formado pelo local oriundo de  $P1$  e tipo e taxa de utilização oriundos de ( $P2$ ) e o cromossomo filho ( $F2$ ) é formado pelo local oriundo de  $P2$  e tipo e taxa de utilização oriundos de ( $P1$ ).

O operador mutação é utilizado para introduzir uma diversificação adicional na população com o intuito de evitar a convergência para ótimos locais.

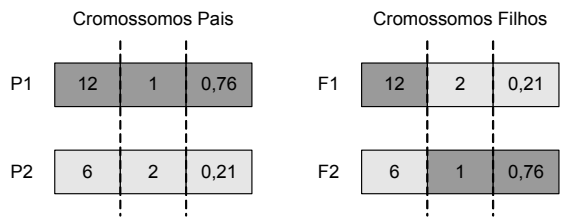


Figura 23: Cruzamento quando considerado apenas um equipamento FACTS

Cada indivíduo da população tem a probabilidade  $p_{mut}$  de sofrer mutação ao longo das gerações. A mutação é realizada simultaneamente nas três primeiras subdivisões do cromossomo (Figura 18) e consiste na geração aleatória de novos locais de instalação, tipos e capacidades dos equipamentos. Assim como no operador cruzamento, novamente convém ressaltar que após a determinação do cromossomo mutado, a factibilidade desse é analisada através da execução de um FPO. Se por ventura venha-se a constatar que o indivíduo gerado pelo operador mutação não é factível, esse indivíduo é automaticamente descartado e o cromossomo original é mantido.

Além das técnicas apresentadas para a diversificação da população, o operador genético mutação naturalmente ajuda na diversidade da população. Uma vez que altera arbitrariamente gens aleatórios da população, o operador mutação introduz meios para que novos elementos estejam presentes na população, aumentando sua diversidade. Desta forma, assegura-se a probabilidade de explorar grande parte do espaço de busca e minimiza-se a probabilidade da solução obtida ser um ótimo local.

4.2.7 Elitismo da População

Após a definição dos parâmetros do AG e da população inicial do problema, o operador seleção é aplicado e os cromossomos pais são escolhidos. Ressalta-se que, neste trabalho, o número de pais considerado foi constante

e igual a 50% da população. Com base nesses cromossomos pais, a etapa de cruzamento é efetuada, dando origem a novos filhos. A nova população é formada por dois conjuntos de soluções. O primeiro conjunto, de tamanho igual à 50% da população, é constituído pelos melhores indivíduos da população anterior. O segundo conjunto é criado por seleção, que é feita verificando-se todos os indivíduos da população anterior e seus filhos. A Figura 24 mostra esse processo.

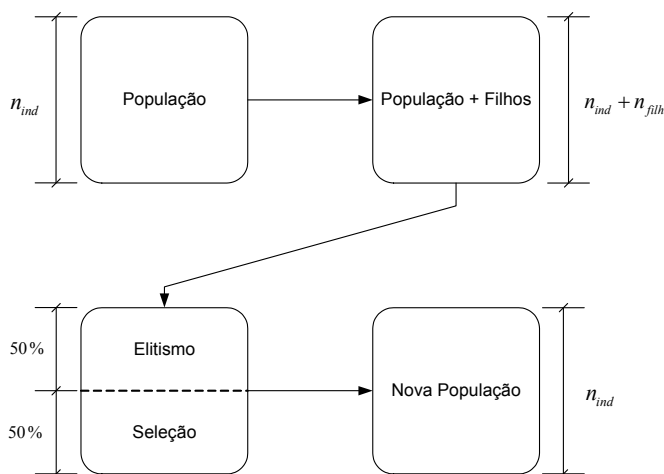


Figura 24: Elitismo do AG

#### 4.2.8 Algoritmo de Solução

O procedimento para a obtenção da fronteira de eficiência do problema tem início com a leitura dos parâmetros da simulação, tais como número máximo de gerações, número de indivíduos considerados, probabilidade de cruzamento, probabilidade de mutação, entre outros. Além disso, faz-se necessário a definição do sistema utilizado, as capacidades máximas dos equipamentos FACTS considerados e a função objetivo considerada (minimização

do desvio de tensões ou máxima transferência de potência).

Uma vez que os parâmetros iniciais necessários tenham sido obtidos, o primeiro passo é a definição de forma aleatória da população inicial para dar início ao processo iterativo. O procedimento consiste em obter *nind* indivíduos, sendo cada um uma solução factível do problema. É sobre essa população que serão aplicadas as próximas etapas do processo. Os indivíduos são avaliados, através da execução de um FPO que determina a factibilidade das soluções, e a técnica de *fitness sharing* é aplicada. Em seguida os operadores seleção, cruzamento e mutação são aplicados, sendo novamente necessário a execução de um FPO para garantir que os novos indivíduos sejam factíveis. Uma vez que se tem novos indivíduos na população, faz-se necessária, através da execução do FPO, uma nova avaliação dos indivíduos para o cálculo da função aptidão atualizada. O procedimento é realizado até que o número máximo de gerações seja atingido.

Um algoritmo para a solução do problema é apresentado na Figura 25 na qual é possível perceber, mesmo que de uma maneira simplificada, todas as principais etapas, incluindo as relacionadas ao FPO.

Convém ressaltar o que já foi discutido anteriormente. Se por ventura, dentro dos processos de obtenção da população inicial e aplicação dos operadores cruzamento e mutação, uma solução do problema se apresentar não factível, essa solução é automaticamente descartada.

Ao se aprofundar um pouco mais nos detalhes da metodologia desenvolvida, entende-se o procedimento apresentado na Figura 25 como sendo cinco diferentes etapas, todas apresentadas a seguir. Note que, de uma forma simplificada, estas etapas constituem uma lista de tarefas (pseudocódigo) à serem executadas para a solução do problema, tendo por finalidade a obtenção da alocação ótima de equipamentos FACTS.

**Etapas 0:** Leitura dos parâmetros da simulação, entre eles:

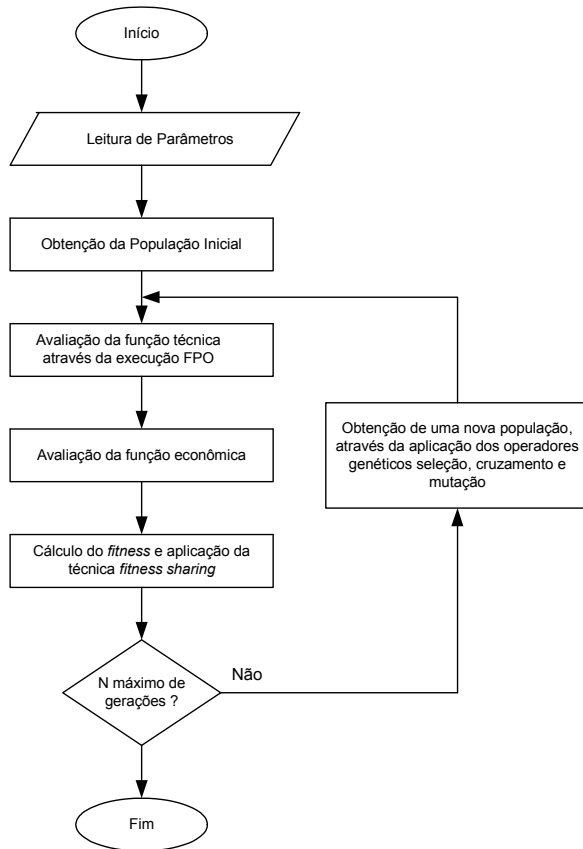


Figura 25: Algoritmo para solução do problema

- Dados do sistema a ser simulado e capacidades máximas dos equipamentos FACTS considerados;
- Parâmetros do AG

**Etapa 1:** formação da população inicial. Considerada a base para as demais etapas do algoritmo. A população é formada por (*nind*) in-

divíduos;

- Cada indivíduo representa um local de inserção dos equipamentos FACTS;
- Através da execução de um FPO com base nos locais de inserção dos equipamentos FACTS seus tipos e suas capacidades, são calculadas as funções técnicas e econômicas dos indivíduos;
- O cálculo do *rank* dos indivíduos permite que a fronteira de Pareto seja definida, dando origem a função aptidão dos indivíduos;
- A técnica de *fitness sharing* é aplicada para diversificar a população.

**Etapla 2:** é aplicado o operador seleção considerando todos os indivíduos da população. De acordo com a a probabilidade de seleção de cada indivíduo, relacionada com sua respectiva função aptidão, esses são selecionados para a etapa de cruzamento. São os indivíduos que repassarão suas características para as gerações futuras, pois foram selecionados para a aplicação do operador cruzamento.

- Ocorre a troca de material genético entre os cromossomos pais da população, dando origem a novos cromossomos filhos. Nota-se que a troca de informações entre os cromossomos gera novos locais de instalação de equipamentos FACTS, bem como diferente tipos e capacidades.

**Etapla 3:** o operador genético cruzamento, apresentado na seção 4.2.6.2, é aplicado. Há a introdução de novos indivíduos na população. Com isso há na população os indivíduos originais acrescidos dos indivíduos filhos gerados na operação cruzamento. Além disso, há a aplicação do operador mutação, auxiliando a preservação da diversidade da população.

- Novamente, através da execução de um FPO com base nos locais de inserção dos equipamentos FACTS, são calculadas as funções técnicas e econômicas dos indivíduos;
- Através do cálculo do *rank* dos indivíduos, a fronteira de Pareto é novamente definida, dando origem a nova função aptidão de cada indivíduo da população;
- A técnica de *fitness sharing* é aplicada para diversificar a população.

**Etapla 4:** separação da população em dois blocos distintos. O primeiro é a seleção dos 50% melhores indivíduos da população. Com base na função aptidão, estes serão repassados automaticamente para a próxima geração, não sendo aplicado nenhum método probabilístico de seleção. Ao segundo bloco, são aplicados os mecanismos de seleção baseados no método da roleta, apresentado no Capítulo 4, formando os 50% restantes da população.

- Faz-se necessária o calculo, através da execução de um FPO, das novas funções técnicas e econômicas e consequentemente do novo *rank* da população;
- Através do cálculo do *rank* dos indivíduos, a fronteira de Pareto é novamente definida, dando origem a nova função aptidão de cada indivíduo da população;
- A técnica de *fitness sharing* é aplicada para diversificar a população.

**Etapla 5:** a união dos dois blocos da terceira etapa constitui a nova população. Nota-se que 50% são oriundos de elitismo e 50% são baseados em um método de seleção probabilístico.

- O procedimento é repetido até que o número máximo de gerações seja atingido;
- Enquanto o número máximo de gerações não é atingido, volta-se a etapa 2.

O processo é finalizado após o número máximo de gerações ser atingido e é apresentado como solução do problema o local de instalação dos FACTS, seus tipos e suas capacidades.

### **4.3 Conclusões**

Neste capítulo foi descrito a metodologia desenvolvida para alocação ótima de FACTS em sistemas de potência. Primeiramente, foram apresentadas as principais características do problema que se deseja resolver. Em seguida, a codificação do problema foi apresentada através do detalhamento do cromossomo utilizado para representação das soluções. Além disso, foi abordada a forma como a população inicial é obtida, bem como o critério de convergência da metaheurística desenvolvida. A questão da preservação da diversidade da população foi então abordada, através da técnica de *fitness sharing*. Por fim, um algoritmo para solução do problema foi apresentado, detalhando as principais etapas do processo iterativo.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados computacionais obtidos com aplicação da metaheurística AGMO.



## 5 RESULTADOS NUMÉRICOS

### 5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados numéricos obtidos com a aplicação da metodologia AGMO desenvolvida. Três sistemas testes são utilizados: (i) sistema teste do IEEE de 30 barras e (ii) um sistema equivalente da região Sul do Brasil de 182 barras denominado Sul-182 e (iii) um sistema equivalente Inglês. São analisados seis diferentes casos, 2 (dois) utilizando o sistema teste IEEE - 30 barras, um utilizando o sistema equivalente Inglês de 40 barras (ENG-40) e três utilizando o sistema real equivalente da região Sul (Sul-182). De acordo com as funções técnicas apresentadas no Capítulo 2, são realizadas diferentes análises, considerando a função técnica do desvio quadrático das tensões em relação a 1pu e a maximização da transferência de potência entre duas áreas distintas. Por fim, os resultados são analisados e são obtidas conclusões a respeito das análises.

### 5.2 Considerações Iniciais

Algumas informações sobre os três sistemas considerados são apresentadas na Tabela 4, na qual é possível verificar o número de barras do sistema, número de geradores, a carga ativa total e a carga reativa total. Os detalhes do sistema Sul (SUL-182) são apresentados no Apêndice B ao final desse trabalho e maiores detalhes sobre o sistema equivalente Inglês de 40 barras (ENG-40) podem ser encontrados em (MINGUEZ et al., 2007)

Tabela 4: Resumo dos sistemas simulados

Sistema	Barras	Geradores	$P_d^{tot}$ (MW)	$q_d^{tot}$ (MVar)
IEEE-30	32	5	283	126
SUL-182	182	23	3463,90	652,03
ENG-40	40	8	41	7

A metodologia foi implementada no software de programação Matlab

e as simulações foram obtidas em um PC INTEL Pentium 4 2.0 GHz com Sistema Operacional Windows Vista Home Basic com 2 Gb de memória RAM. Para os sistemas testados, são apresentados as soluções presentes na fronteira de Pareto, bem como a influência dessas soluções na operação do sistema.

### 5.2.1 Parâmetros do AGMO

Entre os mais importantes parâmetros do AGMO desenvolvido estão: o tamanho da população ( $n_{ind}$ ), o número de gerações a partir da qual considera-se a obtenção da fronteira de Pareto ( $n_{ger}$ ), a probabilidade de cruzamento (*cross-over*) e a probabilidade de mutação. Na literatura os valores encontrados estão na faixa de 60 a 100% para a probabilidade de cruzamento e entre 0,1 e 5% para a probabilidade de mutação. Neste trabalho são mantidos fixos a probabilidade de cruzamento (100%) e a probabilidade de mutação (5%). O número de indivíduos da população ( $n_{ind}$ ) e o número de gerações ( $n_{ger}$ ) dependem da complexidade do problema e são determinados experimentalmente. No entanto, observa-se que o número de indivíduos e o número de gerações possuem relação direta com o tamanho do espaço de busca e, portanto, influenciam de maneira concreta o resultado do problema. Além dos parâmetros anteriormente descritos, o AGMO possui o parâmetro  $\sigma_{sh}$  apresentado no Capítulo 3. Na literatura, um valor frequentemente utilizado é  $\sigma_{sh} = 0,5$ , vide por exemplo (DEB; KALYANMOY, 2001), e portanto este valor é tomado como base neste trabalho.

Neste trabalho foram utilizados diferentes parâmetros, de acordo com o sistema simulado. No próximo item, é feito um resumo dos casos simulados e os parâmetros utilizados são informados.

## 5.3 Resumo dos Casos Simulados

- **CASO I:** Caso utilizando o sistema teste IEEE 30 barras usado para verificar se o algoritmo fornece resultados coerentes em termos de

comportamento do sistema em regime permanente. A função técnica empregada é a soma dos desvios quadráticos das tensões. É feito um acréscimo de 30% na carga de uma barra do sistema e posteriormente é verificado se tal barra aparece entre as soluções não dominadas obtidas pelo algoritmo.

Para a obtenção dos resultados, os seguintes parâmetros do AG foram empregados:

- **Número de Gerações:** 100

- **Número de Indivíduos:** 60

- **CASO II:** Caso que utiliza também o sistema IEEE 30 barras, porém analisa a alocação de equipamentos FACTS no sistema utilizando a função técnica maximização da transferência de potência. Duas diferentes áreas são determinadas e o objetivo é maximizar o fluxo de potência de uma área para a outra. Para a obtenção das simulações, os seguintes parâmetros do AG foram empregados:

- **Número de Gerações:** 100

- **Número de Indivíduos:** 60

- **CASO III:** Caso que utiliza o sistema o ENG 40. Como função técnica, utiliza-se a soma dos desvios quadráticos das tensões em relação a 1.0pu. Para a obtenção das simulações, os seguintes parâmetros do AG foram empregados:

- **Número de Gerações:** 100

- **Número de Indivíduos:** 60

- **CASO IV:** Estudo realizado com o sistema Sul-182. Como função técnica, utiliza-se a soma dos desvios quadráticos das tensões em

relação a 1.0pu. Para a obtenção dos resultados, os seguintes parâmetros do AG foram empregados:

- **Número de Gerações:** 200
- **Número de Indivíduos:** 400
- **CASO V:** Caso semelhante ao Caso II, porém considerando a contingência da linha 525 kV Salto Santiago-Itá - contingência mais severa da região Sul. Assim como no caso anterior, utiliza-se a função de minimização do desvio quadrático de tensão em relação a um 1 pu. Os seguintes parâmetros do AG foram empregados:
  - **Número de Gerações:** 200
  - **Número de Indivíduos:** 400
- **CASO VI:** Caso simulado também com o sistema Sul-182 porém utilizando a máxima transferência de potência para o Rio Grande do Sul como critério técnico. Para tanto, os fluxos nas LTs 525kV Itá - Gravataí, Campos Novos - Gravataí e Itá - Santo Ângelo são maximizados. Para a obtenção dos resultados, os seguintes parâmetros do AG foram empregados:
  - **Número de Gerações:** 400
  - **Número de Indivíduos:** 200

## 5.4 Casos Analisados

### 5.4.1 CASO I

Para comprovar a funcionalidade do AGMO implementado, é proposto uma primeira análise utilizando o sistema IEEE-30 barras com a demanda na barra 10 acrescida em 30%. A ideia é comprovar que, devido ao

aumento de carga, fica complicado atender a carga com tensão mínima de 0,95 pu.

Originalmente, a demanda de potência ativa na barra é de 5,8 MW e, após o incremento de 30%, essa passa a ser de 7,54 MW. A demanda reativa original é de 2,0 Mvar e após o incremento passa a ser 2,6 Mvar. É possível analisar a robustez da metodologia desenvolvida, pois o sistema apresenta uma carência de reativos no entorno desse barramento, sendo esse um provável local de inserção do SVC.

O resultado apresentado na Tabela 5 foi obtido em uma simulação considerando a inclusão de 1 (um) equipamento FACTS do tipo SVC no sistema IEEE-30, considerando a função técnica de minimização do desvio quadrático das magnitudes de tensão em relação a 1 pu. A AGMO obteve 9 soluções não dominadas neste caso. Na Tabela, a primeira coluna representa o número da solução não dominada, a segunda coluna apresenta o número da barra na qual será inserido o equipamento, ou seja, barra que irá conter um FACTS do tipo SVC, e a terceira e quarta colunas apresentam, respectivamente, o valor da função técnica e econômica em cada solução obtida.

Tabela 5: Resultados para o Sistema IEEE-30

Solução	Barra	$F_t$	$F_e(\text{US\$}/\text{kVAr})$	Capacidade
1	22	0.1705	133.98	33.30
2	20	0.1080	134.02	35.80
3	25	0.1495	133.58	33.19
4	10	0.0713	135.47	50.61
5	21	0.0656	135.49	50.72
6	20	0.1112	133.98	32.71
7	10	0.0406	138.94	64.99
8	10	0.0163	139.15	91.41
9	10	0.0133	139.38	93.01

Constata-se que grande parte das alocações foram na vizinhança da barra com carga incrementada, tais como as barras 21 e 22 que se conectam diretamente à barra 10 (dez). A Tabela 5 mostra também que soluções que

indicam a inserção do SVC na barra 10 possuem os menores valores de função técnica. Por outro lado, é apresentado, como solução que minimiza a função econômica associada ao problema, a inserção do SVC na barra 25. Pode-se verificar, através da Tabela 5, a sensibilidade da magnitude de tensão quando considerada a inserção de um SVC a barra 10 (solução 9). Tal solução é a que apresenta melhor critério técnico, ou seja, solução que apresenta menor desvio quadrático de tensão.

Tabela 6: Soluções não-dominadas para o Sistema IEEE-30

Solução	Barra	$V_{orig}$	$V_{otm}$	Varição (%)
6	10	0.9994	1.0203	2.04
	21	0.9876	1.0065	1.87
	22	0.9885	1.0067	1.80

Percebe-se que além de contribuir para a elevação da tensão no ponto de inserção (barra 10), o SVC melhora as tensões nos barramentos vizinhos (barras 21 e 22), o que acaba contribuindo para a otimização do critério técnico. A Figura 26 apresenta uma comparação do perfil de tensão do sistema com e sem o SVC na barra 10. Percebe-se que, como era de se esperar, a inserção do SVC proporciona um perfil de tensão melhor distribuído. Em especial, nota-se que, além de contribuir para a elevação da tensão na barra 10, o equipamento eleva as tensões das barras vizinhas (21 e 22), deixando-as mais próximas de 1.0pu.

#### 5.4.2 CASO II

Para avaliar a metodologia considerando o critério técnico de maximização da transferência de potência, novamente é utilizado o sistema IEEE 30 barras, representado na Figura 27. As seguintes alterações foram realizadas no sistema teste: a constituição de duas áreas distintas denominadas Areas 1 e 2 e a consideração de 5 geradores, conectados às barras 1, 2, 5, 11 e 13. A função técnica é composta pela somas dos fluxos

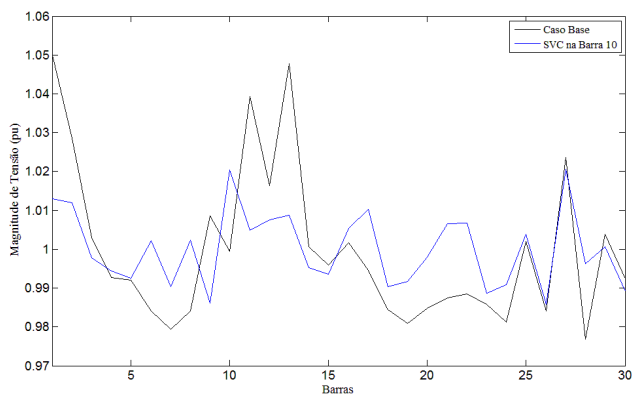


Figura 26: Comparação do perfil de tensões para o sistema IEEE-30

de potência nas linhas 2-5, 2-6, 4-6, 16-17 e 18-19 e 23-24, , maximizando a transferência de potência da Área 1 para a Área 2.

O resultado do AGMO, considerando a inserção de 2 equipamentos FACTS dos tipos SVC e TCSC, é apresentado na Tabela 7. Na segunda coluna é apresentado o local de instalação do equipamento (índice da barra, no caso de SVC ou a linha, no caso de TCSC).

Neste caso, o AGMO obteve 11 soluções não dominadas, sendo 6 prevendo somente a instalação de SVCs. Pode-se verificar que a inclusão de dois equipamento FACTS do tipo SVC nas barras 10 e 16 (solução 1) é a solução que apresenta melhor critério técnico, uma vez que a transferência de potência alcança os 1,63pu. Devido ao fato do sistema apresentar baixa capacidade de suporte de reativos no entorno das barras 10 e 16, a inclusão dos equipamentos SVCs eleva as tensões nessas regiões e possibilita uma maior transferência de potência nos circuitos da interligação. Com a inserção dos SVCs, a transferência de potência passa a ser limitada somente pela potência ativa gerada pelos geradores da Área 2, os quais, após o processo de otimização, estão

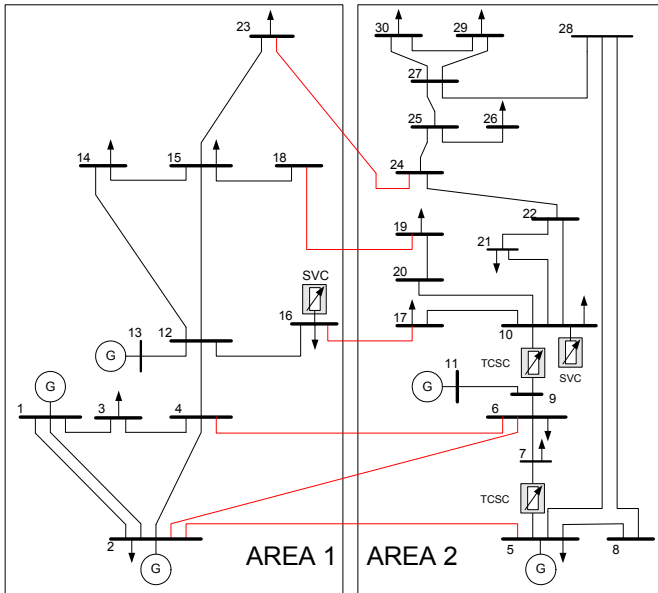


Figura 27: Sistema IEEE 30 Barras

todos em seus respectivos limites mínimo de geração, não havendo, portanto, condições para elevação da transferência.

Pode-se verificar que a inclusão de dois equipamento FACTS do tipo TCSC nas linhas 9-10 e 5-7 (solução 11), é a solução de apresenta melhor critério econômico. No entanto, tal solução representa uma transferência de potência de 1,21 pu, bem abaixo da apresentada pela solução 1.

Na Figura 28 é apresentada a fronteira de eficiência do problema. É possível verificar que a fronteira de eficiência não é convexa. Nota-se que o emprego da técnica de *fitness sharing* leva à obtenção de um representativo número de soluções não dominadas, que se distribuem de forma bastante uniforme na fronteira de eficiência.

Na Figura 29 é apresentada uma comparação da transferência de



Tabela 7: Soluções não-dominadas para o Sistema IEEE-30

Solução	Local	Tipo	$F_t$ (pu)	$F_e$ (US\$/kVar)
1	10 16	SVC SVC	1.639	286.83
2	17 16	SVC SVC	1.621	283.30
3	19 12	SVC SVC	1.554	275.18
4	12 19	SVC SVC	1.553	275.18
5	15 18	SVC SVC	1.486	273.39
6	10 12 – 16	SVC TCSC	1.373	273.13
7	12 5	SVC SVC	1.371	268.81
8	10 2 – 6	SVC TCSC	1.289	267.42
9	9 10 – 21	SVC TCSC	1.249	267.81
10	10 9 – 11	SVC TCSC	1.243	267.78
11	9 – 10 5 – 7	TCSC TCSC	1.219	267.30

potência considerando o caso Base (sem adição de FACTS), e das soluções 1 e 11. O valor da transferência de potência sem a inserção de nenhum equipamento FACTS, quando considerada a maximização do carregamento nos circuitos da interligação, é 1,19pu. Utilizando TCSCs na linhas 9-10 e 5-7 (solução 11), o valor da transferência de potência é 1,22pu, ou seja, um acréscimo de 2,52% em relação ao Caso Base. Porém, com a inserção de um FACTS do tipo SVC na barra 10 e um SVC na barra 16 (solução 1), o valor da transferência de potência é 1,64pu, ou seja um acréscimo de 37,82% em relação ao Caso Base. O restante das soluções apresentadas na Tabela 7 são alternativas para a inclusão de equipamentos, as quais ponderam os critérios técnico e econômico, e estão contidas dentro do intervalo de transferência [1,22 1,64]pu e o intervalo de custo [267,30 286,83] US\$/kVar.

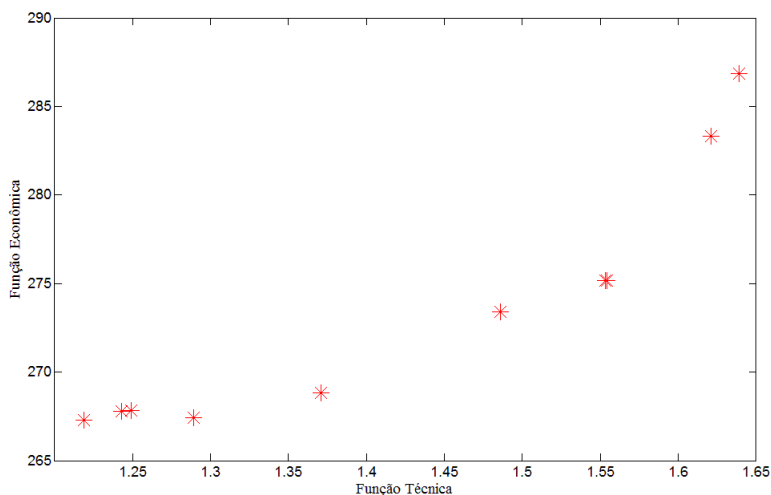


Figura 28: Fronteira de Eficiência - Caso II

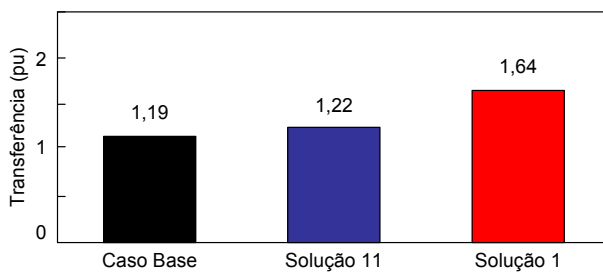


Figura 29: Comparação da transferência de potência - Caso II

### 5.4.3 CASO III

Neste caso, o sistema ENG-40 (MINGUEZ et al., 2007) foi usado para analisar o desempenho do AGMO quando o critério técnico é a minimização do desvio quadrático em relação a 1pu. O resultado da aplicação da metodo-

logia proposta considerando a alocação de 4 equipamentos FACTS é apresentado na Tabela 8. São apresentadas as 14 soluções não dominadas resultantes do processo de otimização.

Tabela 8: Resultados para o Sistema ENG-40

Solução	Barras	$F_t$	$F_e$ (US\$/kVAr)
1	29, 32, 33, 37	0.48	403.88
2	31, 4, 29, 33	0.61	403.69
3	33, 32, 11, 29	0.65	403.13
4	33, 1, 29, 23	0.67	402.59
5	30, 31, 11, 29	1.03	401.27
6	31, 4, 11, 29	1.07	401.10
7	33, 1, 8, 30	1.07	398.86
8	33, 1, 4, 16	1.36	398.74
9	33, 1, 23, 7	1.44	397.67
10	31, 4, 8, 30	1.57	395.84
11	5, 9, 8, 30	1.66	395.50
12	5, 9, 4, 16	1.96	395.16
13	5, 9, 16, 4	1.96	395.16
14	5, 9, 23, 7	2.05	393.35

Verifica-se que a solução que minimiza a função técnica é a inclusão de um FACTS nas barras 29, 32, 33 e 37 (solução 1). Em (MINGUEZ et al., 2007) todas essas barras foram escolhidas, usando o método de Benders, para a alocação ótima de SVCs. As simulações indicaram que o sistema, na composição original, apresenta uma região com problema de suporte de reativos composta pelas barras 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36 e 37.

Por outro lado, a inclusão dos equipamentos nas barras 5, 7, 9 e 23 (solução 14) é a solução que minimiza o critério econômico e, portanto, apresenta a função técnica mais elevada entre as 14 soluções apresentadas. As demais soluções representam alternativas para a alocação do equipamento, todas pertencentes a fronteira de eficiência do problema que é mostrada na Figura 30. Observa-se que essa fronteira não é convexa.

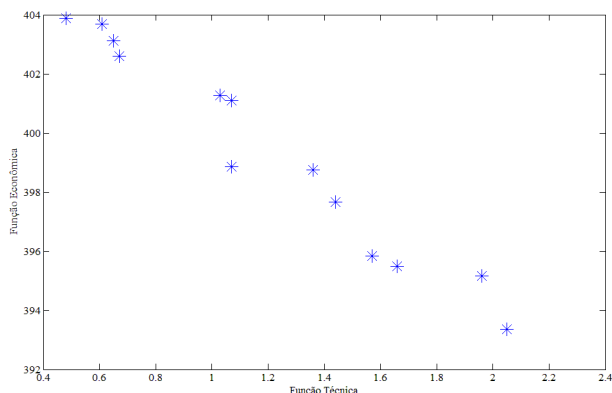


Figura 30: Fronteira de Eficiência - Caso III

#### 5.4.4 CASO IV

Nos estudos realizados com o sistema Sul-182 considerou-se a rede completa, ou seja, que todos equipamentos nela presentes estão em perfeita operação. Os dados do sistema, incluindo os geradores e seus respectivos limites operacionais, são informados no Apêndice B.

As soluções não dominadas obtidas pelo AGMO proposto considerando a inserção de 1 equipamento FACTS são apresentadas na Tabela 9. A primeira coluna identifica o número da solução, a segunda o local de instalação do equipamento FACTS, a terceira e quarta representam, respectivamente, as funções técnica e econômica associadas, e a quinta representa a capacidade do equipamento.

Nota-se que todas as soluções indicam a inserção do equipamento FACTS tipo SVC. Isso ocorre devido ao fato de que o sistema considerado ser um sistema real, diversas barras com tensões de valores reduzidos. Percebe-se que a barra de CURITIBA-525kV é a que aparece com maior frequência nas

Tabela 9: Soluções não-dominadas para o Caso IV

Solução	Local	Tipo	$F_t$ (pu)	$F_e$ (US\$/kVAr)	Capacidade (Mvar)
1	CURITIBA-525	SVC	0.3889	139.3828	90.5889
2	BLUMENAU-525	SVC	0.3893	139.3800	87.1593
3	CURITIBA-525	SVC	0.3894	139.3800	97.1488
4	CURITIBA-525	SVC	0.3903	139.3800	73.2167
5	CURITIBA-525	SVC	0.3908	138.0549	73.8342
6	CURITIBA-525	SVC	0.3917	134.3693	41.9988
7	CURITIBA-525	SVC	0.3941	134.0956	37.8667
8	BLUMENAU-525	SVC	0.3948	133.9877	33.1345

8 soluções apresentadas. Constata-se também que a solução que a apresenta melhor critério técnico é a solução 1 - inserção do SVC na barra CURITIBA-525 com capacidade de aproximadamente 90 Mvar. A Tabela 10 mostra as tensões em barras representativas do sistema na condição original e com a inserção do SVC em Curitiba-525. A primeira coluna apresenta a barra do sistema, a segunda apresenta a tensão original da barra sem a presença do SVC ( $V_{orig}$ ), a terceira apresenta a tensão da barra com SVC ( $V_{svc}$ ) e a quarta apresenta a variação da tensão com a inserção do SVC na barra de Curitiba.

Tabela 10: Tensões nas Barras da região de Curitiba com e sem a presença do SVC

Barra	$V_{orig}$	$V_{svc}$	Variação (%)
CURITIBA-525	0.9538	1.0038	5.36
CURITIBA-230	1.0105	1.0087	0.69
BLUMENAU-525	0.9523	0.9852	1.85
BLUMENAU-230	1.0095	1.0171	2.45
AREIA -525	1.0011	1.0070	1.28

Nota-se que a inserção de um SVC na barra de Curitiba 525kV além de elevar a tensão na própria barra, também eleva as tensões nos barramentos vizinhos, como pode ser observado nas tensões de Blumenau 525 kV e Areia 525 kV. Entretanto, a atuação mais contundente é no local de inserção do SVC, ou seja, na tensão de Curitiba 525 kV.

Por outro lado, a inserção de um SVC na barra de BLUMENAU-525 (solução 8) é a que apresenta menor critério econômico - custo de aproximadamente 133 US\$/kVAr. A Tabela 11 mostra as tensões nas mesmas barras da Tabela 10 considerando a inserção do SVC em Blumenau-525. Observa-se que o equipamento eleva a tensão da barra de Blumenau-525, porém não soluciona o problema de tensão reduzida em Curitiba-525.

Tabela 11: Tensões nas Barras da região de Curitiba com e sem a presença do SVC

Barra	$V_{orig}$	$V_{svc}$	Variação (%)
CURITIBA-525	0.9538	0.9613	0.78
CURITIBA-230	1.0105	1.0091	0.13
BLUMENAU-525	0.9523	0.9835	3.17
BLUMENAU-230	1.0095	1.0159	0.63
AREIA -525	1.0011	1.0008	0.03

A Figura 31 apresenta a fronteira de Pareto obtida pelo algoritmo. Observa-se, mais uma vez, que a fronteira não é convexa. Nota-se também que o desempenho da técnica de fitness sharing foi pior do que o observado para o sistema IEEE-30, já que as soluções não dominadas não estão uniformemente distribuídas na fronteira.

#### 5.4.5 CASO V

O resultados obtidos para esse caso também utilizam o sistema Sul-182, porém neste caso o estudo sobre alocação ótima de equipamentos FACTS foi realizado considerando a contingência da LT Santo Santiago - Itá. Tal contingência foi analisada por ser a contingência mais severa do sistema. As soluções obtidas pela metodologia proposta considerando a inserção de 1 equipamento FACTS são apresentadas na Tabela 12. A primeira coluna identifica o número da solução, a segunda o local de instalação do equipamento FACTS, a terceira e quarta representam respectivamente as funções técnica e econômica associadas e a quinta representa a capacidade do equipamento.

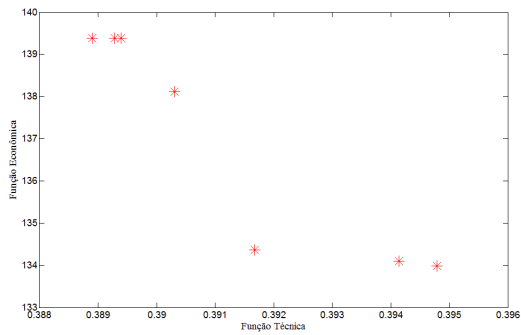


Figura 31: Fronteira de Eficiência - Caso IV

Tabela 12: Soluções não-dominadas para o Caso V

Solução	Local	Tipo	$F_t$ (pu)	$F_e$ (US\$/kVAr)	Capacidade (Mvar)
1	GRAVATAÍ-525	SVC	0.3879	134.9531	49.1364
2	CURITIBA-525	SVC	0.4468	133.9997	31.6055
3	CURITIBA-525	SVC	0.5124	134.1367	38.6890
4	PICARRAS-138	SVC	0.9315	133.9930	32.1293
5	TROMBUDO-138	SVC	0.9561	133.9807	33.6451

Percebe-se que, para o caso com contingência, a barra de Curitiba 525kV não é mais a solução que otimiza o critério técnico. Neste caso, a barra de Gravataí, também em 525 kV, apresenta o melhor critério técnico. Observa-se que há uma diferença considerável entre capacidade do equipamento alocado em Gravataí-525 e os equipamentos alocados nas demais barras. A análise das tensões com e sem a presença do SVC na região de Gravataí é apresentada na Tabela 13. A primeira coluna apresenta a barra do sistema, a segunda apresenta a tensão original da barra sem a presença do SVC ( $V_{orig}$ ), a terceira apresenta a tensão da barra com SVC ( $V_{svc}$ ) e a quarta apresenta a variação da tensão com a inserção do SVC na barra de Curitiba.

Nota-se que a inserção de um SVC na barra de Gravataí 525kV eleva

Tabela 13: Tensões nas Barras da região de Gravataí com e sem a presença do SVC

Barra	$V_{orig}$	$V_{svc}$	Variação (%)
GRAVATAI-525	0,9500	0,9990	5.36
GRAVATAI-230	0,9845	1,0184	0.69
CNOVOS -525	0.9867	0.9882	1.85
ITA -525	0,9907	1.0043	2.45

principalmente a tensão no barramento de Gravataí 525 kV. Percebe-se que tal tensão sem a presença do SVC está no limite mínimo e após a inserção do SVC esta é elevada a valores muito próximos de 1pu. Além disso, as tensões nos barramentos vizinhos também sofrem pequenas alterações, como pode ser observado nas tensões de Campos Novos 525 kV e Itá 525 kV.

Por outro lado, a solução que indica a inserção de um SVC em Trombudo-138 é a que possui menor custo. A Tabela 14 indica as tensões na região com e sem o SVC. Observa-se que, diferente da solução que maximiza o critério técnico, a alocação do SVC na SE 138 kV Trombudo, embora solucione o problema da própria barra, não traz benefícios para as tensões das barras de Gravataí, Campos Novos e Itá.

Tabela 14: Tensões nas Barras da região de Gravataí com e sem a presença do SVC na barra de Trombudo-138 kV

Barra	$V_{orig}$	$V_{svc}$	Variação (%)
TROMBUDO-138	0,9903	1,0480	5.50
GRAVATAI-525	0.9500	0.9500	0
GRAVATAI-230	0.9845	0.9873	0.28
CNOVOS -525	0.9867	0.9878	0.11
ITA -525	0,9907	0,9915	0,08

A Figura 32 apresenta a fronteira de Pareto obtida neste Caso. Observa-se que tenham sido obtidos pontos os extremos dessa fronteira, não há uma boa distribuição das soluções não dominadas. Este fato indica a necessidade de se implementar melhorias na técnica de diversificação empregada.



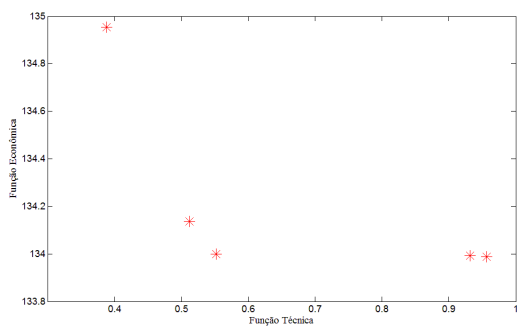


Figura 32: Fronteira de Eficiência - Caso V

5.4.6 CASO VI

Este estudo avalia o recebimento de potência pelo Rio Grande do Sul e considera rede completa. Para maximizar o recebimento de potência pelo estado, são maximizados os fluxos de potência nas LTs 525 kV Itá-Gravataí, Itá-Santo Ângelo e Campos Novos Gravataí. Embora haja outras conexões com o estado, pode-se considerar as três linhas de 525 kV como as mais importantes conexões.

Inicialmente obteve-se a máxima transferência de potência sem a inserção de nenhum equipamento FACT. Para o caso base, a Tabela 15 apresenta os fluxos de potência ativa obtidos nas linhas de 525 kV que fazem fronteira com o Rio Grande do Sul:

Tabela 15: Soluções não-dominadas para o Sistema Sul-182

Linha	Tensão (kV)	Fluxo(pu)
Itá-Gravataí	525 kV	6.4987
Itá-Santo Ângelo	525 kV	6.0864
Campos Novos - Gravataí	525 kV	1.6331
Total		14.2182

O resultado do AGMO, considerando a inserção de 1 equipamento FACTS é apresentado na Tabela 16. Na primeira coluna é apresentado o número da solução, na segunda é apresentado o local de instalação do equipamento, na terceira seu tipo e na quarta e quinta, respectivamente, as funções técnica e econômica.

Tabela 16: Soluções não-dominadas para o Sistema Sul-182 considerando rede completa e o critério de maximização da transferência de potência

Solução	Local	Tipo	$F_t$ (pu)	$F_e$ (US\$/kVAr)
1	LT 525 kV Campos Novos - Gravataí	TCSC	15.1515	133.7500
2	LT 525 kV Campos Novos - Gravataí	TCSC	15.0602	132.9105
3	LT 230 kV Curitiba - Joinville	TCSC	14.8810	129.6096

Neste caso, o AGMO obteve 3 soluções não dominadas, sendo todas as soluções prevendo somente a instalação de TCSC. Pode-se verificar que a inserção de um FACTS do tipo TCSC na LT 525 kV Campos Novos - Gravataí (solução 1) é a solução que apresenta melhor critério técnico, uma vez que a transferência de potência alcança os 15,1515pu. Por outro lado, inserção de um FACTS do tipo TCSC na LT 230 kV Curitiba - Joinville (solução 3) é a solução que otimiza o critério econômico. Entretanto, todas as três soluções apresentadas na tabela são ótimas do ponto de vista de Pareto.

Na Figura 33 é apresentada uma comparação da transferência de potência considerando o caso Base (sem adição de FACTS), e das soluções 1 e 3. O valor da transferência de potência sem a inserção de nenhum equipamento FACTS, quando considerada a maximização do carregamento nos circuitos da interligação, é 14,2182pu. Utilizando TCSC na linhas LT 230 kV Curitiba - Joinville (solução 3), o valor da transferência de potência é 14,8810pu, ou seja, um acréscimo de 4,45% em relação ao Caso Base. Porém, com a inserção de um TCSC na LT 525 kV Campos Novos - Gravataí (solução 1), o valor da transferência de potência é 15,1515pu, ou seja um acréscimo de 6,16% em relação ao Caso Base.

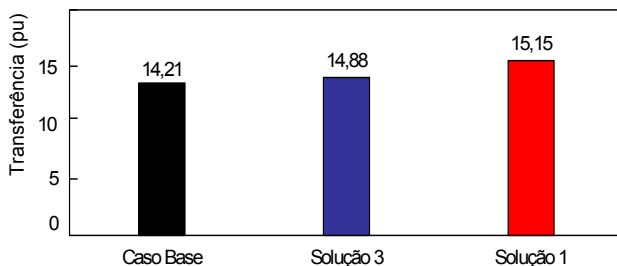


Figura 33: comparação da transferência de potência - Caso VI

### 5.5 Frequência da Soluções

Nesta seção é realizado um estudo para analisar a frequência que as soluções não-dominadas se repetem, considerando um determinado número de vezes de execução da metodologia. Para tanto, é considerado a análise apresentada no CASO IV. No estudo, o AGMO foi executado 10 vezes. As soluções obtidas são analisadas e é verificada frequência com que as soluções eficientes são obtidas. A Tabela 17 apresenta as soluções não-dominadas obtidas no conjunto de simulações e também o percentual de vezes que cada solução foi indicada como solução não-dominada do problema.

Tabela 17: Frequência das soluções não-dominadas

Solução	Local	Frequência (%)
1	CURITIBA-525	80
2	BLUMENAU-525	40
3	CNOVOS-525	20
4	ITA-525	10
5	SSANTIAGO-525	10
6	CURITIBA-230	20
7	BIGUACU-138	10
8	BLUMENAU-138	10
9	BLUMENAU-230	10

Observa-se que durante a execução das repetidas simulações, 9

soluções estiveram presentes na fronteira de eficiência do problema. A alocação de SVC na SE 525 kV Curitiba apresenta a maior frequência entre as barras analisadas, estando presente na fronteira de eficiência do problema em 80% das simulações. Tal constatação é ratificada pela análise das tensões apresentadas na Tabela 10. Na Tabela é possível perceber que a SE 525 kV apresenta, originalmente, tensão de 0,9538pu. Com o inserção do SVC, a tensão na SE 525 kV Curitiba é elevada para 1,0038, constatando que este é um local adequado para inserção do equipamento. A alocação na SE 525 kV Blumenau representa a segunda maior frequência de alocação, estando presente na fronteira de eficiência do problema em 40% das simulações.

Embora com frequência mais reduzida, ao longo das simulações foram alocados SVCs nas SE 525 kV Campos Novos em 20% das simulações; na SE 525 kV Itá em 10% das simulações e na SE 525 kV Salto Santiago em 10% das simulações. Além disso, foram alocados também SVCs nas SE 230 kV Curitiba em 20 % das simulações e na SE 138 kV Biguaçu 10% das simulações.

## 5.6 Escolha dos Parâmetros do AGMO

Nas seções anteriores, foram apresentados seis casos de aplicação da metodologia proposta, com parâmetros definidos após diversas simulações. Nesta seção, realiza-se uma avaliação das funções técnica e econômica considerando uma variação nos parâmetros número de gerações (*ngcr*) e número de indivíduos (*nind*). Para tanto, considera-se a análise do CASO IV (simulação do sistema SUL-182).

A Figura 34 apresenta o comportamento da função técnica quando o parâmetro número de indivíduos é incrementado. Nessa análise, o número de gerações é mantido fixo, 200 gerações e o número de indivíduos é incrementado de 80 até 400.

Analisando a Figura 34 verifica-se que dentro do intervalo de variação

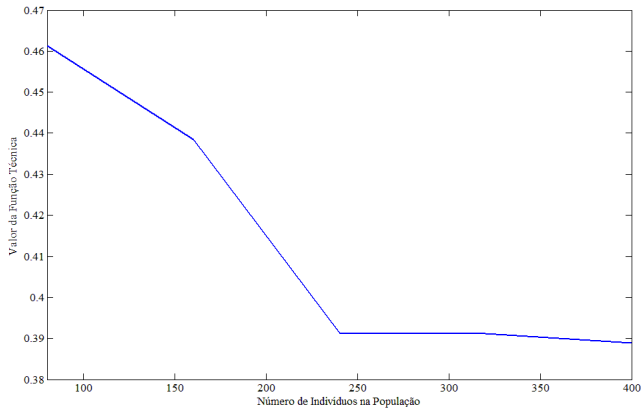


Figura 34: Comportamento da função técnica frente variação de (*nind*)

do número de indivíduos na população (*nind*) são observados variações da função técnica do problema. Para *nind* = 60 o valor da função técnica é aproximadamente 0,46 e a medida que o número de gerações é incrementado o valor da função técnica vai diminuindo. A partir de *nger* = 240 o valor da função técnica passa a não sofrer grandes variações, indicando que o aumento do número de indivíduos não leva a significativas melhoras na função técnica. Com isso, chega-se a conclusão de que, considerando o sistema SUL-182, de 300 à 400 indivíduos na população pode ser considerado um bom valor para o parâmetro (*nind*).

Uma análise semelhante é apresentada na Figura 35, porém considerando o parâmetro (*nger*). Verifica-se que, assim como na análise anterior, dentro do intervalo de variação do número de gerações (*nger*) são observados variações da função técnica do problema. Inicialmente, para *nger* = 40 o valor da função técnica é aproximadamente 0,39 e a medida que o número de gerações é incrementado o valor da função técnica vai diminuindo. Entre-

tanto, diferentemente do parâmetro ( $nind$ ) o número de gerações não possui grande influência na função técnica, uma vez que essa apresenta uma pequena variação, conforme pode ser verificado na Figura. Com isso, chega-se a conclusão de que, considerando o sistema SUL-182, de 100 à 200 gerações pode ser considerado um bom valor para o parâmetro ( $nger$ ).

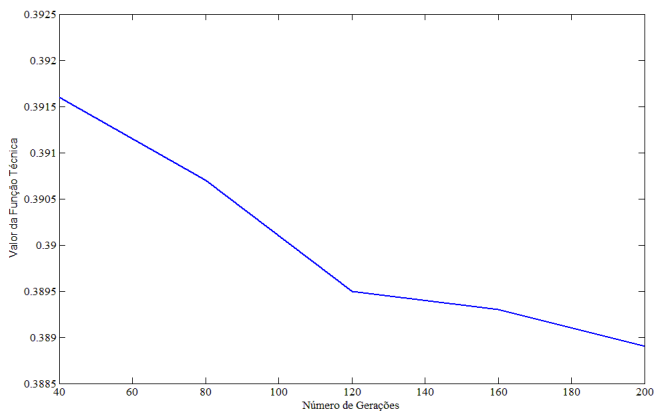


Figura 35: Comportamento da função técnica frente variação de ( $nger$ )

## 5.7 Conclusões

Neste capítulo foi analisado o desempenho da metodologia desenvolvida para alocação ótima de FACTS (AGMO).

Primeiramente, foi realizada uma simulação utilizando o sistema IEEE-30 para comprovar a eficiência da metodologia na alocação de SVC em um ponto com demanda incrementada. Foi possível comprovar que, diante de uma região com problema de suporte de reativos, o AGMO foi capaz de identificar tal região e alocar um equipamento SVC na mesma.

Na sequência, também utilizando o sistema IEEE-30 foi realizada uma

análise com duas diferentes áreas do sistema, maximizando a transferência de potência. Ficou comprovada a potencialidade da metodologia desenvolvida neste tipo de análise, tendo em vista os incrementos obtidos no aumento da transferência de potência.

Por fim, foram feitas três diferentes simulações, todas utilizando o sistema equivalente da região Sul. Os resultados obtidos mostram a potencialidade da ferramenta, inclusive com aplicações em um sistema real. Dentre os aspectos observados nos seis casos simulados, destaca-se que fronteira de Pareto não é convexa e que, em alguns casos, dependendo do tipo de análise realizada, a fronteira de Pareto foi composta por poucas soluções não-dominadas e essas não estão devidamente distribuídas ao longo da fronteira. Tal constatação evidencia a necessidade de melhoras na técnica de *fitness sharing* ou até mesmo a utilização de outra técnica de diversificação de soluções.





## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Esta dissertação teve como foco principal o estudo e desenvolvimento de uma metodologia para alocação de FACTS do tipo SVC e TCSC em sistemas de potência, utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo (AGMO) e Fluxo de Potência Ótimo (FPO). Como já discutido anteriormente, a alocação ótima dos equipamentos FACTS é um problema de difícil solução, razão pela qual diversos métodos heurísticos têm sido empregados. Este trabalho estende os estudos anteriores utilizando AGMO em conjunto com algoritmos de fluxo de potência ótimo.

Foram abordadas as principais metodologias desenvolvidas, tanto para modelagem quanto para a aplicação de FACTS em sistemas de potência. Alguns dos principais trabalhos publicados na área de otimização multiobjetivo foram analisados e suas principais características foram discutidas. Uma breve descrição dos equipamentos FACTS existentes e a modelagem dos equipamentos de primeira geração foram apresentadas. O problema de fluxo de potência ótimo foi introduzido e as representações dos equipamentos SVC e TCSC no problema FPO foram abordadas.

Como o problema a ser resolvido é multiobjetivo e possui variáveis inteiras, foram apresentados os conceitos envolvidos com otimização multiobjetivo inteiro-mista. Primeiramente, foi apresentado o conceito da fronteira de Pareto e um exemplo aplicado a sistemas de potência foi detalhado, no qual foi possível exemplificar a obtenção da fronteira de eficiência para dois objetivos conflitantes. Em seguida, foram abordadas diversas características de problemas com variáveis inteiras e foram apresentadas as técnicas usadas na sua resolução.

Por fim, a metodologia proposta foi testada em diferentes sistemas, sob diferentes condições operativas, e os resultados comprovaram o potencial da aplicação de algoritmos genéticos multiobjetivo na alocação de equipamentos

FACTS em sistemas de potência.

## 6.1 Conclusões

Do trabalho realizado podem ser tiradas conclusões de caráter geral e mais estritamente relacionadas aos resultados obtidos. Primeiramente, deve-se dizer que o uso conjunto de AGMO e um algoritmo de fluxo de potência ótimo se mostrou importante para a resolução do problema de alocação ótima de equipamentos FACTS. A metodologia se mostrou viável e, como será discutido a seguir, pode ser estendida a estudos mais abrangentes sobre esse problema. Em segundo lugar, podem ser tiradas várias conclusões relacionadas à qualidade dos resultados obtidos:

- A metodologia desenvolvida foi primeiramente aplicada à um sistema teste do IEEE de 30 barras com a demanda em uma barra incrementada em 30%. Com isso foi possível comprovar a robustez da técnica desenvolvida, uma vez que a alocação do FACTS do tipo SVC se deu de fato na região com carência de reativos. Constatou-se que grande parte das alocações foram na vizinhança da barra 21 e 22, barras que se conectam diretamente à barra 10.
- A avaliação da aplicação da metodologia considerando o critério técnico de maximização da transferência de potência foi apresentada considerando o sistema IEEE 30 barras como algumas modificações. Para esse caso o AGMO obteve 11 soluções não dominadas, sendo 6 prevendo somente a instalação de SVCs. Ganhos foram obtidos na maximização da transferência de potência, uma vez que chegou-se a um aumento de aproximadamente 37% na transferência de potência considerando a alocação de FACTS do tipo SVC nas barras 10 e 16.
- A análise considerando o sistema ENG-40 permitiu que uma comparação com uma metodologia baseada na decomposição de

Benders fosse realizada. A análise apresentada no Caso III, indica 14 soluções não-dominadas, sendo a inserção de SVCs nas barras 29, 32, 33, e 37 a solução que otimiza o critério técnico. Tal solução é exatamente a mesma solução apresentada pela técnica de Benders, ratificando a escolha das soluções do AGMO.

- A aplicação do AGMO ao sistema equivalente da região Sul, considerando a condição normal de operação, foi apresentada no Caso IV e indicou, entre outras soluções, a inserção de um FACTS do tipo SVC na SE 525 kV Curitiba. Além dessa solução também foram indicadas as possibilidades de inserção de equipamentos na SE 525 kV Blumenau. Para a operação no caso da contingência da LT 525 kV Salto Santiago - Itá, considerada a contingência mais severa da região Sul, foi indicada a inserção de FACTS do tipo SVC na SE 525 kV Gravataí, elevando as tensões na própria SE e também em subestações vizinhas.
- Na análise das repetidas soluções do Caso IV, foi possível verificar a frequência que as soluções estiveram presentes na fronteira de eficiência. Isso indicou que, mesmo considerando diferentes populações iniciais, o AGMO desenvolvido foi capaz de ratificar as escolhas de instalação de equipamentos FACTS, uma vez que as SE 525 kV Curitiba e Blumenau foram os locais de maior incidência de alocação de FACTS em grande parte das simulações.
- Na análise da variação dos parâmetros número de indivíduos na (*nind*) e número de gerações (*nger*) foi possível, através da análise gráfica do comportamento da função técnica associada ao problema, determinar os parâmetros adequados, considerando o sistema SUL-182.
- No estudo de avaliação do recebimento de potência pelo Rio Grande do Sul foram maximizados os fluxos de potência nas LTs 525 kV Itá-

Gravataí, Itá-Santo Ângelo e Campos Novos Gravataí. O AGMO obteve 3 indicações de inserção de equipamentos FACTS do tipo TCSC e verificou-se que a inserção de um FACTS do tipo TCSC na LT 525 kV Campos Novos - Gravataí otimiza o critério técnico, uma vez que a transferência atinge valores de 15,15pu, aproximadamente 6% superior aos 14,21pu originais. Além disso, inserção de um FACTS do tipo TCSC na LT 230 kV Curitiba - Joinville foi a solução que otimizou o critério econômico, apresentando uma elevação na transferência de potência de aproximadamente 4%.

Por fim, pode-se dizer que somente uma formulação bastante específica do problema de alocação ótima de equipamentos FACTS foi analisada neste trabalho. Sendo assim, são feitas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Dentre as possibilidades de ampliações dos estudos realizados, podem ser listadas as seguintes considerações:

- Inclusão de indicadores sobre o comportamento dinâmico do sistema dentro da função técnica. Tal inclusão poderá ser feita sobre a forma de penalidades, ou seja, caso a solução não respeite um dado indicador dinâmico, sua qualidade técnica seria reduzida;
- Expandir a metodologia desenvolvida para a incorporação de novos equipamentos FACTS, tais como STATCOM, SSSC e UPFC. A referência (DUPIN; ALMEIDA, 2008) pode servir de embasamento teórico para as futuras análises, uma vez que apresenta a modelagem dos FACTS de segunda geração, baseados em conversores CC-CA, no problema do fluxo de potência ótimo;

- Aprimoramento da função técnica de maximização da transferência de potência entre duas áreas;
- Novos estudos visando o aprimoramento da técnica de diversificação de soluções, uma vez que, dependendo do cenário utilizado, foram apresentados resultados com baixo número de soluções e se verificou-se que essas não estiveram bem distribuídas ao longo da fronteira de Pareto;
- Novos estudos considerando diferentes cenários, patamares de carga e principalmente estudos e testes de fim de reduzir o tempo de processamento do algoritmo e comprovar a aplicabilidade do AGMO desenvolvido em sistema reais.



## APÊNDICE A – SOLUÇÃO PELO MÉTODO DE PONTOS INTERIORES

Em 1986 Adler e colaboradores apresentaram o método de pontos interiores (ADLER et al., 1986). O ponto chave do método é a transformação das restrições de desigualdade em restrições de igualdade, através da incorporação de variáveis de folga e da associação de uma função barreira logarítmica à função objetivo. Assim, forma-se a função lagrangeana expandida somente com restrições de igualdade e aplica-se as condições de Karush-Kuhn-Tucker (BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 2006).

Com a incorporação das variáveis de folga e a introdução da função barreira logarítmica, o problema de fluxo de potência ótimo pode ser escrito, de forma compacta, como:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & f(x) - \mu \left( \sum_i \ln s_{L_i} + \sum_i \ln s_{U_i} \right) \\
 \text{s.a:} \quad & g(x) = 0 \\
 & h(x) - s_L = h^{\min} \\
 & h(x) + s_U = h^{\max} \\
 & s_U, s_L \geq 0 \\
 & S \geq 0, \quad \pi \geq 0
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

A função Lagrangeana associada a este problema é:

$$\begin{aligned}
L(x, s_L, s_U, \lambda, \pi_L, \pi_U) = & f(x, u) - \mu \left( \sum_i \ln s_{L_i} + \sum_i \ln s_{U_i} \right) - \lambda^T g(x) + \\
& - \pi_L^T \left( h(x) - s_L - h^{\min} \right) - \pi_U^T \left( h(x) + s_U - h^{\max} \right)
\end{aligned} \tag{A.2}$$

As condições necessárias de primeira ordem são:

$$\nabla_x L = 0 \rightarrow \nabla_x f(x, u) - (J(x, u))^T \lambda - (\nabla_x h(x))^T (\pi_L + \pi_U) = 0 \tag{A.3}$$

$$\nabla_{\lambda} L = 0 \rightarrow -g(x, u) = 0 \tag{A.4}$$

$$\nabla_{\pi_L} L = 0 \rightarrow h(x) - s_L - h^{\min} = 0 \tag{A.5}$$

$$\nabla_{\pi_U} L = 0 \rightarrow h(x) + s_U - h^{\max} = 0 \tag{A.6}$$

$$\nabla_{s_L} L = 0 \rightarrow \mu e - s_L \pi_L = 0 \tag{A.7}$$

$$\nabla_{s_U} L = 0 \rightarrow \mu e + s_U \pi_U = 0 \tag{A.8}$$

onde  $J(x)$  é a matriz Jacobiana de  $g(x)$  e  $s_L$  e  $s_U$  são matrizes diagonais compostas pelos elementos dos vetores  $s_l$  e  $s_u$ , respectivamente. O sistema de equações não lineares pode ser resolvido pelo método de Newton (SUN et al., 1984), sendo composto pelas seguintes equações:



$$H_1(x, \lambda, \pi_L, \pi_U) \Delta x - (J(x, u))^T \Delta \lambda - (\nabla_x h(x))^T \Delta \pi_L - (\nabla_x h(x))^T \Delta \pi_U = -\nabla_x L \quad (\text{A.9})$$

$$-g(x, u) \Delta x = g(x, u) \quad (\text{A.10})$$

$$\nabla_x h(x) \Delta x - \Delta s_L = -\left(h(x) - s_L - h^{\min}\right) \quad (\text{A.11})$$

$$\nabla_x h(x) \Delta x + \Delta s_U = -(h(x) + s_U - h^{\max}) \quad (\text{A.12})$$

$$-S_L \Delta \pi_L - \Pi \Delta s_L = -(\mu e - s_L \pi_L) \quad (\text{A.13})$$

$$S_U \Delta \pi_U - \Pi \Delta s_U = -(\mu e - s_U \pi_U) \quad (\text{A.14})$$

onde:

$$H_1(x, \lambda, \pi_L, \pi_U) = \nabla_x^2 f(x) - \lambda^T \nabla_x^2 g(x) - (\pi_L + \pi_U)^T \nabla_x^2 h(x) \quad (\text{A.15})$$

$\Pi_L$  e  $\Pi_U$  são matrizes diagonais compostas pelos vetores  $\pi_L$  e  $\pi_U$ , respectivamente. As derivadas de primeira e segunda ordem resultantes da modelagem do problema, são encontradas em (ALMEIDA, 1994). Re-escrevendo matricialmente o conjunto de equações lineares, tem-se:

$$[H] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \\ \Delta \pi_L \\ \Delta \pi_U \\ \Delta s_L \\ \Delta s_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nabla_x L \\ g(x, u) \\ -(h(x) - s_L - h^{\min}) \\ -(h(x) + s_U - h^{\max}) \\ -(\mu e - s_L \pi_L) \\ -(\mu e - s_U \pi_U) \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

onde:

$$H = \begin{bmatrix} H_1(x, \lambda, \pi_L, \pi_U) & -J(x)^T & -\nabla_x h(x)^T & -\nabla_x h(x)^T & 0 & 0 \\ -J(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\nabla_x h(x) & 0 & 0 & 0 & -U & 0 \\ -\nabla_x h(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & U \\ 0 & 0 & -S_L & 0 & -\Pi_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_U & 0 & -\Pi_U \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

onde  $U$  é a matriz identidade.

Tendo obtido a solução do sistema linear (A.16.) é necessário calcular comprimento do passo para que as restrições de não negatividade das variáveis de folga e multiplicadores de Lagrange  $\pi_L$  e  $\pi_U$  sejam satisfeitas. Para tanto, de acordo com (GRANVILLE, 1994) para calculo do passo pode-se utilizar as seguintes expressões:

$$\gamma_P = \min \left[ \min_{\Delta s_L < 0} \frac{s_L}{|\Delta s_L|}, \min_{\Delta s_U < 0} \frac{s_U}{|\Delta s_U|}, 1 \right] \quad (\text{A.18})$$

$$\gamma_D = \min \left[ \min_{\Delta \pi_L < 0} \frac{\pi_L}{|\Delta \pi_L|}, \min_{\Delta \pi_U > 0} \frac{\pi_U}{|\Delta \pi_U|}, 1 \right] \quad (\text{A.19})$$

Assim, as novas aproximações para as variáveis são obtidas como sendo:

$$x = x + \sigma \gamma_P \Delta x \quad (\text{A.20})$$

$$s_L = s_L + \sigma \gamma_P \Delta s_L \quad (\text{A.21})$$

$$s_U = s_U + \sigma \gamma_P \Delta s_U \quad (\text{A.22})$$

$$\lambda = \lambda + \sigma \gamma_D \Delta \lambda \quad (\text{A.23})$$

$$\pi_L = \pi_L + \sigma \gamma_D \Delta \pi_L \quad (\text{A.24})$$

$$\pi_U = \pi_U + \sigma \gamma_D \Delta \pi_U \quad (\text{A.25})$$

onde  $\sigma$  é uma constante tendo por finalidade a garantia de interioridade da nova solução. Conforme a literatura, o valor 0,9995 tem sido constantemente utilizado, resultando em boas aproximações.

Por fim, faz-se necessário a atualização do parâmetro barreira ( $\mu$ ). Ainda de acordo com (GRANVILLE, 1994) uma maneira de atualizar o parâmetro é:

$$\mu = \frac{s_L^T \pi_L - s_U^T \pi_U}{2n\beta} \quad (\text{A.26})$$

onde  $\beta$  é um parâmetro informado pelo usuário e  $n$  é o número de variáveis de decisão.

Para a solução do problema apresentado em (A.1) via o método de pontos interiores, o seguinte algoritmo é utilizado:

1. Inicialização das variáveis e multiplicadores de Lagrange;
2. Cálculo do valor do gradiente da função Lagrangeana;

3. Teste das condições de convergência. Se são satisfeitas a solução ótima é encontrada. Do contrário, ir para o passo 4;
4. Cálculo da matriz  $H$ ;
5. Resolução o sistema linear (A.17) e obter os incrementos de todas as variáveis do problema;
6. Determinação os comprimentos de passo  $\gamma_P$  e  $\gamma_D$ ;
7. Atualização as variáveis, usando as expressões (A.24) - (A.25);
8. Cálculo do novo parâmetro de barreira  $\mu$ , usando (A.26). Retornar ao passo 2.

## APÊNDICE B – DADOS DO SISTEMA SUL-182

Neste apêndice são apresentados os dados do sistema equivalente da região Sul do Brasil. Primeiramente, são apresentados os dados de barra e na sequência são apresentados os dados dos circuitos.

Tabela 18: Dados de barra do Sistema Sul-182

Num	Nome	Tensão	$p_g$	$q_g$	$q_g^{min}$	$q_g^{max}$	$P_d$	$Q_d$
1	CAMBORIÚ-24 946	0.0	0.0	-999.	999.	6.10	3.00	
2	CAMBORIÚ13.8	940	0.0	0.0	-999.	999.	9.00	3.00
3	PICAR.2-13.8	930	0.0	0.0	-999.	999.	1.90	5.20
4	PICAR.1-13.8	930	0.0	0.0	-999.	999.	3.50	0.90
5	IT.SAL.T3-24	965	0.0	0.0	-999.	999.	6.80	1.70
6	ISS-TT1,2-24	976	0.0	0.0	-999.	999.	17.30	3.80
7	ITAJAI2-13.8	986	0.0	0.0	-999.	999.	3.20	9.00
8	ITAJAI-2-24	988	0.0	0.0	-999.	999.	5.90	0.50
9	BRUSQUET1-24	997	0.0	0.0	-999.	999.	8.60	3.90
10	BQE-TT2,3-24	979	0.0	0.0	-999.	999.	28.40	2.80
11	PICARRAS13.8	986	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	11.30
12	GASPAR—24	979	0.0	0.0	-999.	999.	9.00	4.20
13	IBIRAMAT2-24	970	0.0	0.0	-999.	999.	1.50	0.70
14	IBIRAMAT1-24	979	0.0	0.0	-999.	999.	5.20	2.40
15	TIMBO—24	1004	0.0	0.0	-999.	999.	18.50	7.60
16	US.CEDROS-24	957	7.3	4.5	-995.	995.	0.10	0.10
17	US.PALMEI.24	932	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
18	US.PALME.-G2	1000	8.6	-2.6	-7.	10.	0.00	0.00
19	US.PALME.-G1	1000	8.6	-2.6	-907.	910.	0.00	0.00
20	US.SALTO-8.5	1000	3.4	4.5	4.	4.	0.00	0.00
21	US.SALTO-24	988	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
22	BL.SALTO-24	988	0.0	0.0	-999.	999.	27.90	10.10
23	BL.GAR.T8-24	997	0.0	0.0	-999.	999.	2.90	2.10
24	BLU.GARCIA24	988	0.0	0.0	-999.	999.	23.50	8.60
25	BLUME.2-13.8	962	0.0	0.0	-999.	999.	1.80	1.40
26	BLUM.2-T2-24	988	0.0	0.0	-999.	999.	5.30	1.50
27	BLUM.2-T1-24	988	0.0	0.0	-999.	999.	6.30	1.90
28	TROMBUDO-24	988	0.0	0.	-999.	999.	5.00	2.80
29	RIO.DO.SUL24	992	0.0	0.	-999.	999.	5.60	2.50
30	RIO.SUL-2-24	983	0.0	0.0	-999.	999.	10.00	2.60

31	0	TEKA—69	948	0.0	0.0	-999.	999.	4.50	2.50
32	0	INDAIAL-A-69	920	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
33	0	TIMBO—69	913	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
34	0	C.VOLTA.GR69	929	0.0	0.0	-999.	999.	0.80	0.30
35	0	US.PALMEI.69	950	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
36	0	INDAIAL-B-69	951	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
37	0	FIOV/KARS.69	949	0.0	0.0	-999.	999.	8.00	4.00
38	0	ALTONA—69	1006	0.0	0.0	-999.	999.	4.00	2.00
39	0	CREMER—69	1006	0.0	0.0	-999.	999.	6.30	2.90
40	0	ARTEX—69	1012	0.0	0.0	-999.	999.	7.00	3.80
41	0	BL.GARCIA-69	1014	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
42	0	BL.SALTO—69	958	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
43	0	BLUMENAU2-69	969	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
44	0	IBIRAMA—69	959	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
45	0	RIO.DO.SUL69	993	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
46	0	RIO.SUL-2-69	993	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
47	1	ILHOTA2—13	959	0.0	-5.0	-5.	5.	0.50	0.20
48	1	ILHOTA1—13	960	0.0	-5.0	-5.	5.	0.50	0.20
49	0	C.C.C.P.—69	978	0.0	0.0	-999.	999.	3.40	1.20
50	0	CAMBORIU—69	948	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
51	0	PICARRAS—69	954	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
52	0	BRUSQUE—69	1000	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
53	0	ITAJ.SALS.69	978	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
54	0	ILHOTA—69	1000	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
55	0	ILHOTA—B00	1012	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
56	0	ILHOTA—A00	1012	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
57	0	TIJUCAST3-24	988	0.0	0.0	-999.	999.	10.00	6.00
58	0	TIJUCAST2-24	988	0.0	0.0	-999.	999.	3.50	1.00
59	0	INE-TT2-13.8	986	0.0	0.0	-999.	999.	3.90	2.80
60	0	INE-TT1-13.8	986	0.0	0.0	-999.	999.	4.00	2.60
61	0	TRIN.T2-13.8	986	0.0	0.0	-999.	999.	8.00	5.00
62	0	TRIN.T1-13.8	986	0.0	0.0	-999.	999.	8.80	5.50
63	0	ICO-TT2-13.8	986	0.0	0.0	-999.	999.	5.50	3.00
64	0	ICO-TT1-13.8	986	0.0	0.0	-999.	999.	8.00	3.50
65	0	COQU.T3-13.8	978	0.0	0.0	-999.	999.	6.00	3.00
66	0	COQU.T2-13.8	985	0.0	0.0	-999.	999.	4.50	2.50
67	0	COQU.T1-13.8	984	0.0	0.0	-999.	999.	4.50	2.50
68	0	US.GARC.13.8	970	0.0	0.0	-999.	999.	0.40	0.20
69	1	US.GARC.6.9B	971	4.4	2.0	-2.	2.	0.00	0.00
70	1	US.GARC.6.9A	971	4.4	2.0	-2.	2.	0.00	0.00
71	0	ROCA.T6-13.8	1000	0.0	0.0	-999.	999.	2.00	1.00
72	0	ROCA.T5-13.8	986	0.0	0.0	-999.	999.	11.00	7.00
73	0	ROCA.T4-13.8	986	0.0	0.0	-999.	999.	10.00	8.00
74	0	COQUEIROS-69	933	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
75	0	US.GARCIA-69	974	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
76	0	FLORIANO—69	949	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
77	0	PALHOCA-13.8	986	0.0	0.0	-999.	999.	8.60	6.00
78	1	JLACERDA—G2	1000	0.0	0.0	-999.	999.	1.25	0.60

79	1	JLACERDA-G1	1000	25.0	-12.0	-999.	938.	1.25	0.60
80	0	TUBA.FICT.69	1006	0.0	0.0	-999.	999.	10.00	5.47
81	0	TUBARAO-69	1000	0.0	0.0	-999.	999.	22.52	14.55
82	0	JLACERDA-69	1014	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
83	1	JLACERDA-G4	1000	0.0	0.0	-999.	999.	1.65	0.80
84	1	JLACERDA-G3	976	33.0	-4.7	-999.	955.	1.65	0.80
85	1	JLACERDB-G6	950	0.0	0.0	-999.	999.	4.00	2.00
86	1	JLACERDB-G5	950	80.0	9.1	-999.	125.	4.00	2.00
87	0	CRICIUMA2-69	1022	0.0	0.0	-999.	999.	9.00	4.61
88	0	CRICIUMA-69	1000	0.0	0.0	-999.	999.	63.38	23.86
89	0	SIDER.CEL.69	1027	0.0	0.0	-999.	999.	24.36	9.58
90	0	SIDEROP-69	1029	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
91	0	CHARQUEA-69	1000	0.0	0.0	-999.	999.	34.00	15.00
92	0	PFUNDO-T13	1014	0.0	0.0	-999.	999.	0.50	0.20
93	0	PFUNDO-138	1000	0.0	0.0	-999.	999.	14.00	4.00
94	0	PFUNDO-T00	1014	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
95	1	PFUNDO2-13	950	70.0	-15.3	-999.	999.	0.00	0.00
96	1	PFUNDO1-13	950	70.0	-15.3	-999.	999.	0.00	0.00
97	0	JVILLE.1-69	985	0.0	0.0	-999.	999.	37.34	5.94
98	0	JOINVILL-69	986	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
99	0	XANXERE-13	967	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
100	0	XANXERE-00	999	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
101	0	XANXERE-138	1000	0.0	0.0	-999.	999.	174.2	-3.06
102	1	SOSORIOG6-13	1000	0.0	-31.2	-168.	168.	3.30	0.00
103	1	SOSORIOG5-13	1000	0.0	-31.2	-168.	168.	3.30	0.00
104	1	SOSORIOG4-13	1000	125.	0-15.	-168.	168.	0.30	0.00
105	1	SOSORIOG3-13	1000	125.	0-15.	-168.	168.	0.30	0.00
106	1	SOSORIOG2-13	1000	125.	0-15.	-168.	168.	0.30	0.00
107	1	SOSORIOG1-13	1000	125.	0-15.	-168.	168.	0.30	0.00
108	0	CANOINHAS138	998	0.0	0.0	-999.	999.	64.20	-14.8
109	1	SSANTIAG4-19	950	0.0	-79.4	-150.	150.	4.90	0.00
110	1	SSANTIAG3-19	950	300.	0-57.	-150.	150.	0.60	0.00
111	1	SSANTIAG2-19	950	300.	0-57.	-150.	150.	0.60	0.00
112	1	SSANTIAG1-19	950	300.	0-58.	-150.	150.	0.60	0.00
113	0	SSANTIAG-B00	980	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
114	0	SSANTIAG-A00	980	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
115	0	LONDRI-E-230	984	0.0	0.0	-999.	999.	260.4	-21.7
116	1	SSEGREDG3-13	1000	98.5	4.5	-108.	108.	1.47	0.00
117	1	SSEGREDG2-13	1000	98.5	4.5	-108.	108.	1.47	0.00
118	1	SSEGREDG1-13	1000	98.5	4.5	-108.	108.	1.47	0.00
119	0	BRUSQUE-138	958	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
120	0	TROMBUDO-138	974	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
121	0	ITAJAI-2-138	984	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
122	0	BIGUACU-138	1008	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
123	0	TIJUCAS-138	989	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
124	0	ILH.NORTE138	997	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
125	0	TRINDADE-138	1000	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
126	0	IL.CENTRO138	1002	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00

127	0	E.BIGUACU-138	1008	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
128	0	TIJUCAS-138	991	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
129	0	S.JOQUIM-138	984	0.0	0.0	-999.	999.	11.54	2.12
130	0	VIDAL-RJ-138	968	0.0	0.0	-999.	999.	9.66	5.47
131	0	COQUEIR-138	1002	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
132	0	COQUEIR-2-138	1002	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
133	0	FLORIANO-138	1004	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
134	0	PALH.CEL-138	1010	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
135	0	IMBITUBA-138	1000	0.0	0.0	-999.	999.	10.21	-5.33
136	0	JLACERDA-138	1000	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
137	0	PALHOCA-138	1014	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
138	0	PICARRAS-138	1000	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
139	0	SAO.BENTO-138	996	0.0	0.0	-999.	999.	-11.9	-15.1
140	0	JVILLE-4-138	991	0.0	0.0	-999.	999.	106.5	66.96
141	0	E.WEG-138	990	0.0	0.0	-999.	999.	18.40	6.12
142	0	JOINVILL-138	1000	0.0	0.0	-999.	999.	24.43	5.70
143	0	ILHOTA-138	985	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
144	0	GASPAR-138	985	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
145	0	BL.GARCIA-138	976	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
146	0	BLUMEN-2-138	998	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
147	0	RIO.SUL-2-138	975	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
148	0	BLUMENAU-138	997	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
149	0	JLACERDA-230	990	0.0	0.0	-999.	999.	1.30	0.00
150	0	SIDERO-230	982	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
151	0	CHARQUEA-230	998	0.0	0.0	-999.	999.	-29.4	27.05
152	0	NPRATA-CE-230	1016	0.0	0.0	-999.	999.	18.00	9.00
153	0	FARROUPI-230	1008	0.0	0.0	-999.	999.	-2.96	-50.8
154	0	PFUNDO-230	1014	0.0	0.0	-999.	999.	98.00	-26.0
155	0	XANXERE-230	997	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
156	0	PBRANCOE-230	992	0.0	0.0	-999.	999.	-4.00	18.00
157	0	CMOURAO-230	977	0.0	0.0	-999.	999.	71.34	7.95
158	0	CANOINHA-230	1002	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
159	0	SOSORIO-230	997	0.0	0.0	-999.	999.	137.4	-51.4
160	0	AREIA-230	991	0.0	0.0	-999.	999.	116.7	-9.26
161	0	SMATEUSE-230	1002	0.0	0.0	-999.	999.	18.00	8.00
162	0	CURITIBA-230	1002	0.0	0.0	-999.	999.	330.4	130.5
163	0	PALHOCA-230	966	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
164	0	JOINVILL-230	977	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
165	0	JLACERDB-230	990	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
166	0	BLUMENAU-230	1002	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
167	0	LONDRINA-500	980	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
168	2	IVAIPORA-525	950	999.	0.0	-999.	999.	3.10	0.00
169	0	AREIA-525	985	0.0	0.0	-999.	999.	-250.	73.3
170	0	SSEGREGDO-525	983	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00
171	0	SSANTIAG-525	981	0.0	0.0	-999.	999.	4.70	0.00
172	0	GRAVATAI-525	968	0.0	0.0	-999.	999.	745.0	57.0
173	0	CNOVOS-525	995	0.0	0.0	-999.	999.	2.50	0.00
174	0	ITA-525	992	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00



175	CURITIBA-525	958	0.0	0.0	-999.	999.	4.40	0.00
176	BLUMENAU-525	947	0.0	0.0	-999.	999.	1.60	0.00
177	S.ANGELO-525	1000	0.0	0.0	-999.	999.	384.6	30.0
178	GARABI—525	1000	100	0.0	-100.	-100.	0.00	0.00
179	GRAVATAI-230	1000	0.0	0.0	-999.	999.	350.0	122.
180	APUCARANA230	993	0.0	0.0	-999.	999.	65.0	25.0
181	FIGUEIRA-230	940	0.0	0.0	-999.	999.	66.0	-4.0
182	PGROSSAN-230	983	0.0	0.0	-999.	999.	70.0	2.00

Tabela 19: Dados de linha do Sistema Sul-182

Origem	Destino	Resistência (%)	Reatância (%)	Capacitância (Mvar)
16	17	12.78	18.810	10
21	20	0.00	300.00	0
21	20	0.00	300.00	0
21	20	0.00	300.00	0
22	21	0.00	1.000	0
44	31	27.92	39.600	620
44	32	31.39	44.530	699
33	15	0.00	41.850	0
33	15	0.00	100.10	0
33	15	0.00	106.10	0
32	33	3.92	9.290	170
35	17	0.00	104.27	0
35	18	0.00	300.00	0
35	19	0.00	300.00	0
33	35	10.37	26.340	420
34	35	10.51	15.470	220
36	31	4.26	6.040	90
37	35	4.75	7.650	90
42	38	1.30	4.660	1250
38	39	0.55	1.040	20
41	23	0.00	110.67	0
41	24	0.00	61.920	0
41	24	0.00	66.880	0
41	24	0.00	53.530	0
41	39	2.89	5.450	100
40	41	1.54	3.940	59
42	22	0.00	65.680	0
42	22	0.00	84.360	0
36	42	10.82	15.580	239
37	42	4.75	7.650	90
43	25	0.00	106.27	0

Origem	Destino	Resistência (%)	Reatância (%)	Capacitância (Mvar)
45	46	1.26	2.750	40
47	55	0.574	16.630	0
48	56	0.587	14.941	0
50	1	0.00	113.33	0
50	1	0.00	112.53	0
50	2	0.00	104.80	0
50	2	0.00	106.40	0
50	2	0.00	61.360	0
51	3	0.00	104.00	0
51	4	0.00	66.800	0
52	9	0.00	65.360	0
53	5	0.00	65.680	0
53	6	0.00	64.960	0
53	6	0.00	65.520	0
49	53	0.15	0.120	0
50	53	12.52	18.430	270
53	51	24.65	20.790	260
54	55	0.276	-1.910	0
54	56	0.268	-1.583	0
52	54	28.81	23.810	310
53	54	4.27	10.310	180
53	54	4.27	10.310	180
74	65	0.00	78.700	0
74	66	0.00	37.750	0
74	67	0.00	38.500	0
75	68	0.00	201.20	0
75	69	0.00	143.00	0
75	70	0.00	142.50	0
76	71	0.00	109.07	0
74	76	1.96	7.020	119
75	76	21.87	41.970	750
80	82	3.73	5.460	80
81	82	1.93	4.620	80
87	90	3.04	8.360	160
88	90	4.14	11.320	220
88	90	4.14	11.320	220
89	90	1.39	2.040	29
89	90	1.39	2.040	29
92	94	0.665	11.107	0
93	94	0.491	-0.560	0
97	98	0.040	0.100	0
97	98	0.040	0.100	0
99	100	0.599	22.470	0
101	100	0.370	-0.970	0
109	113	0.034	4.323	0
110	113	0.034	4.340	0
111	114	0.034	4.365	0

Origem	Destino	Resistência (%)	Reatância (%)	Capacitância (Mvar)
112	114	0.034	4.359	0
119	10	0.000	59.150	0
119	10	0.000	59.410	0
120	28	0.000	59.150	0
121	7	0.000	59.710	0
121	8	0.000	40.850	0
123	57	0.000	42.000	0
123	58	0.000	43.050	0
124	59	0.000	58.840	0
124	60	0.000	59.540	0
125	61	0.000	42.050	0
125	62	0.000	41.900	0
124	125	3.510	5.460	1120
126	63	0.000	47.960	0
126	64	0.000	47.720	0
127	121	4.592	18.131	4592
122	127	0.132	0.476	120
143	128	2.690	11.810	2740
123	128	0.030	0.080	20
131	125	0.470	1.710	8630
132	126	0.075	0.300	2960
133	72	0.000	42.600	0
133	73	0.000	52.240	0
133	76	1.448	29.424	0
133	76	1.446	29.607	0
133	76	1.480	30.229	0
133	127	0.896	3.229	818
133	128	2.460	10.480	2500
134	77	0.000	60.160	0
136	78	0.000	34.822	0
136	79	0.000	34.822	0
136	82	1.170	33.121	0
136	82	0.939	16.967	0
129	136	9.790	24.200	6540
130	136	18.990	42.670	1119
136	135	2.780	11.290	3060
131	137	1.300	4.660	1250
132	137	1.300	4.660	1250
133	137	0.580	2.370	650
133	137	0.580	2.370	650
134	137	0.450	1.210	290
137	135	4.500	18.280	4969
136	137	6.600	26.830	7280
138	11	0.000	59.510	0
142	98	0.991	31.547	0
142	98	1.025	32.105	0
142	98	0.616	18.754	0

Origem	Destino	Resistência (%)	Reatância (%)	Capacitância (Mvar)
143	142	4.610	18.720	5090
142	138	4.520	17.910	4880
139	142	6.040	14.920	4030
139	142	6.040	14.920	4030
140	142	0.510	1.280	340
140	142	0.510	1.280	340
141	142	2.690	6.910	1720
143	55	0.317	18.250	0
143	56	0.323	18.170	0
143	144	0.810	2.610	680
143	138	1.762	6.134	1694
143	121	1.570	5.660	1440
144	12	0.000	60.460	0
145	41	0.000	31.360	0
145	41	0.000	31.200	0
145	41	0.000	30.240	0
145	119	2.750	7.390	1680
146	43	0.000	10.800	0
146	43	0.000	9.940	0
146	26	0.000	42.500	0
146	27	0.000	41.050	0
147	30	0.000	42.200	0
147	46	0.000	31.160	0
147	46	0.000	32.800	0
147	120	1.630	5.780	1520
148	143	4.060	10.490	2580
148	144	2.900	8.010	2140
145	148	2.000	6.350	1780
145	148	2.000	6.350	1780
146	148	0.080	0.280	80
146	148	0.080	0.280	80
147	148	3.270	11.455	9080
149	83	0.000	28.700	0
149	84	0.000	28.700	0
136	149	0.824	11.826	0
136	149	0.841	11.826	0
150	90	0.286	12.008	0
150	90	0.286	12.008	0
150	90	0.962	50.337	0
150	90	0.923	50.304	0
165	150	0.897	4.637	7980
165	150	0.940	4.842	8349
151	91	0.290	11.995	0
151	91	0.290	11.995	0
153	150	3.854	19.936	34320
151	153	3.370	12.500	22840
153	152	1.217	6.180	10980
154	94	0.195	4.600	0
154	95	0.203	9.262	0

Origem	Destino	Resistência (%)	Reatância (%)	Capacitância (Mvar)
154	96	0.196	9.193	0
152	154	3.739	18.990	33750
153	154	4.601	23.768	40940
155	100	0.143	14.510	0
101	155	0.811	12.541	0
101	155	0.514	12.384	0
101	155	0.509	12.115	0
154	155	1.503	7.776	13390
154	155	1.505	7.776	13400
156	155	1.510	7.732	13570
108	158	0.798	12.320	0
108	158	0.573	12.360	0
159	102	0.000	6.957	0
159	103	0.000	6.957	0
159	104	0.000	6.957	0
159	105	0.000	6.957	0
159	106	0.000	6.957	0
159	107	0.000	6.957	0
159	155	3.074	15.885	27380
159	156	1.629	8.344	14640
157	159	3.429	17.781	30550
157	159	3.434	17.771	30610
160	161	2.460	12.652	21710
160	159	3.041	15.718	27089
160	159	3.045	15.738	27120
158	161	0.908	4.708	8080
162	161	2.210	11.475	19690
162	164	1.895	9.704	17030
162	164	1.892	9.776	16840
137	163	1.107	13.104	0
137	163	1.442	11.810	0
149	163	2.280	11.828	20309
142	164	0.825	12.661	0
142	164	0.767	12.721	0
142	164	0.765	12.637	0
142	164	0.957	12.589	0
165	85	0.000	17.800	0
165	86	0.000	17.800	0
149	165	0.014	0.074	130
148	166	0.564	6.035	0
148	166	0.348	6.283	0
148	166	0.809	12.625	0
148	166	0.809	12.529	0
166	163	2.532	13.132	22550
166	164	1.280	6.567	11520
166	164	1.267	6.571	11210
166	165	3.741	19.359	32280
115	167	0.039	1.207	0

Origem	Destino	Resistência (%)	Reatância (%)	Capacitância (Mvar)
43	42	4.50	10.850	190
43	42	4.50	10.850	190
44	13	0.00	109.07	0
44	14	0.00	67.360	0
45	29	0.00	113.60	0
45	29	0.00	103.47	0
44	46	15.38	22.150	340
173	172	0.245	3.092	377740
169	173	0.162	2.048	250170
174	171	0.172	2.170	265160
172	174	0.315	3.977	485720
173	174	0.097	1.223	150460
162	175	0.031	1.166	0
162	175	0.032	1.163	0
169	175	0.216	2.733	333860
169	175	0.236	2.975	363370
166	176	0.031	1.152	0
176	175	0.127	1.603	195900
176	173	0.260	2.920	360400
177	174	0.200	2.760	285330
178	174	0.320	4.250	481240
178	177	0.120	1.630	168900
179	153	1.580	8.240	13800
179	153	1.580	8.240	13800
179	172	0	1.250	0
179	172	0	1.250	0
180	157	2.170	11.23	19330
180	115	0.340	4.070	13160
180	181	2.180	11.35	19050
182	181	2.590	13.48	22610
182	160	3.440	17.81	30650
168	171	0.154	1.940	236970
168	167	0.110	1.394	170340
169	168	0.159	2.012	245770
160	169	0.031	1.207	0
170	116	0.000	4.200	0
170	117	0.000	4.200	0
170	118	0.000	4.200	0
169	170	0.050	0.650	80490
171	170	0.050	0.700	85750
171	113	0.016	1.101	0
171	114	0.016	1.097	0

## REFERÊNCIAS

- ABDEL-MOAMEN M.A. PRAVEEN KUMAR, B. N. P. P. Optimal location and initial parameter settings of multiple tcscs for reactive power planning using genetic algorithms. *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, p. 341–351, 2005.
- ABIDO, M. Optimal design of power-system stabilizers using particle swarm optimization. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, v. 17, n. 3, p. 406 – 413, set. 2002.
- ADLER, I. et al. An implementation of karmarkar's algorithm for linear programming. *Mathematical Programming*, v. 44, p. 297–335, 1986.
- ALMEIDA, K.; SALGADO, R. Optimal power flow solutions under variable load conditions. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 15, n. 4, p. 1204–1211, nov 2000.
- ALMEIDA, K. C. et al. Assessment of the application of facts equipment to the brasilian iterconnected power system. *XI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - SOPOPE 2009*, v. 1, n. 2, p. 1–6, 2009.
- ALMEIDA, K. C.; SILVA, A. S. *PROJETO ONS-UFSC GAT-CT-177/06 Aplicação de dispositivos FACTS para Ampliação da Capacidade de Transmissão do SIN: Relatório*. [S.l.], 2006.
- ALMEIDA, K. C. de. *A General Parametric Optimal Load Flow*. Tese (Doutorado) — Department of Electrical Engineering, McGill University, Motreal Canada, November 1994.
- AMORIM, E. et al. Multiarea optimal power flow using multiobjective evolutionary algorithm. *Power Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*, p. 1–8, 2009.
- ARROYO, J. E. C. *Heurística e Metaheurísticas para Otimização Combinatória Multiobjetivo*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- BAGHAEE, H. et al. Optimal multi-type facts allocation using genetic algorithm to improve power system security. *Power System Conference, 2008. MEPCON 2008. 12th International Middle-East, Aswan*, n. 1, p. 162–166, mar. 2008.

- BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. *Nonlinear Programming: Theory And Algorithms*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2006. Hardcover. ISBN 0471787779.
- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Comput. Surv.*, ACM, New York, NY, USA, v. 35, n. 3, p. 268–308, September 2003.
- BRASIL, B. C. do. *FOCUS - Relatório de Mercado*. Disponível em: <http://www4.bcb.gov.br/?FOCUSRELMERC> Acesso em: 08 Jan. 2010, 2010.
- CAI, L.; ERLICH, I.; STAMTSIS, G. Optimal choice and allocation of facts devices in deregulated electricity market using genetic algorithms. *Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES*, 2004.
- CARDOSO G., J.; ROLIM, J.; ZURN, H. Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 3, p. 1034 – 1041, 2004.
- CARPENTIER, J. Contribution a l'étude du dispatching economique. *Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens*, v. 3, n. 8, p. 431–447, 1962.
- CARPENTIER, J.; BORNARD, P. Towards an integrated secure optimal operation of power systems. *Advances in Power System Control, Operation and Management, 1991. APSCOM-91., 1991 International Conference on*, Hong Kong, v. 1, p. 1–16, nov. 1991.
- CHUNG, T.; LI, Y. A hybrid ga approach for opf with consideration of facts devices. *Power Engineering Review, IEEE*, v. 20, n. 8, p. 54 –57, aug 2000.
- DEB, K.; KALYANMOY, D. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. 1. ed. [S.l.]: Wiley, 2001. Hardcover.
- DOTTA, D.; SILVA, A. e; DECKER, I. Design of power system controllers by nonsmooth, nonconvex optimization. *Power Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*, p. 1 –7, 2009.
- DUPIN, D. S.; ALMEIDA, K. C. Modelagem de equipamentos facts de segunda geração no fluxo de potência Ótimo. *Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática*, Juiz de Fora, Minas Gerais, v. 1, n. 4, p. 1–6, 2008.



EPE, E. de P. E. . *Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos*. <http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/200912221.pdf>  
Acesso em: 04 Jan. 2010, 2010.

FLORES, M. J. R. *Planejamento da expansão de sistemas de transmissão usando os modelos CC - CA e técnicas de programação não-linear*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2006.

FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. *Genetic Algorithms: Proceedings of the Fifth International Conference*, Morgan Kaufmann, p. 416–423, 1993.

GALIANA, F. et al. Assessment and control of the impact of facts devices on power system performance. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 11, n. 4, p. 1931–1936, Nov 1996.

GAMA, C. Brazilian north-south interconnection control-application and operating experience with a tcsc. In: *Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE*. Edmonton, Canada: [s.n.], 1999. v. 2, p. 1103–1108.

GANDOMKAR, M.; VAKILIAN, M.; EHSAN, M. A combination of genetic algorithm and simulated annealing for optimal dg allocation in distribution networks. *Electrical and Computer Engineering, 2005. Canadian Conference on*, p. 645 –648, may. 2005.

GERBEX, S.; CHERKAoui, R.; GERMOND, A. Optimal location of multi-type facts devices in a power system by means of genetic algorithms. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 16, n. 3, p. 537–544, Aug 2001.

GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. 1. ed. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 1989. Hardcover.

GOLDBERG, D. E.; RICHARDSON, J. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. In: *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms on Genetic algorithms and their application*. Mahwah, NJ, USA: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1987. p. 41–49.

GRANVILLE, S. Optimal reactive dispatch through interior point methods. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 9, n. 1, p. 136–146, fev. 1994.

- GREFENSTETTE, J. J. Optimization of control parameters for genetic algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, IEEE, New York, SMC-16(1), p. 122–128, 1986.
- HINGORANI, N. Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 76, n. 1, p. 481–482, Apr 1988.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. [S.l.]: The MIT Press, 1992.
- LAZZARETTI, A. et al. Classification of events in distribution networks using autonomous neural models. *Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP '09. 15th International Conference on*, p. 1–6, nov. 2009.
- LI, Y.; VENKATASUBRAMANIAN, V. Coordination of transmission path transfers. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 3, p. 1607 – 1615, 2004.
- LIMA, F. et al. Phase shifter placement in large-scale systems via mixed integer linear programming. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 18, n. 3, p. 1029–1034, Aug. 2003.
- LIMA, J. M. et al. Uma nova filosofia para controle de tensão na rede básica. In: *XI simpósio de especialistas em planejamento da operação e expansão elétrica*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 3, n. 1, p. 577–581.
- LIU, B. et al. A new combinatorial meta-heuristic algorithm for stochastic electric power system production costing and operations planning. In: *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on*. Dalian: [s.n.], 2006. v. 2, p. 7429 – 7433.
- MACHADO, R. L. *Aplicação de Dispositivos FACTS no Sistema de Transmissão da Eletrosul*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- MAROUANI, I. et al. Application of a multiobjective evolutionary algorithm for optimal location and parameters of facts devices considering the real power loss in transmission lines and voltage deviation buses. *Systems, Signals and Devices, 2009. SSD '09. 6th International Multi-Conference on*, p. 1 –6, 2009.

- MARTINS, N. Oscillation damping analysis and control studies of the future interconnection between the north-northeast and south-southeast system. *Anais do V Simpósio de especialistas em planejamento e expansão elétrica*, Recife, 1999.
- MINGUEZ, R. et al. Optimal network placement of svc devices. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 22, n. 4, p. 1851–1860, Nov. 2007.
- MOMOH, J.; ZHU, J. Improved interior point method for opf problems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 14, n. 3, p. 1114 –1120, ago. 1999.
- MORI, H.; GOTO, Y. A parallel tabu search based method for determining optimal allocation of facts in power systems. *Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on*, v. 2, 2000.
- MURTY, K. *Linear and Combinatorial Programming*. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1976. 75-136 p.
- MUTALE, J.; STRBAC, G. Transmission network reinforcement versus facts: an economic assessment. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 15, n. 3, p. 961–967, Aug 2000.
- NASSIF, A.; COSTA, V. da; SILVA, L. da. Effects of the svc and the statcom on damping power systems low frequency electromechanical oscillations. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, v. 2, n. 2, p. 120 –125, 2004.
- ONS. - *Operador Nacional do Sistema Procedimentos de Rede, Módulo 14 - Administração dos Serviços Ancilares*. Disponível em <http://www.ons.org.br>. [S.l.], 2003.
- PATERNI, P. et al. Optimal location of phase shifters in the french network by genetic algorithm. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 14, n. 1, p. 37 –42, 1999.
- RADU, D.; BESANGER, Y. A multi-objective genetic algorithm approach to optimal allocation of multi-type facts devices for power systems security. In: *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2006.
- RAMEZANI, M. et al. Short- term electric load forecasting using neural networks. *Computer as a Tool, 2005. EUROCON 2005. The International Conference on*, v. 2, p. 1525–1528, nov. 2005.

- ROCHA, C. R. M. da. *Desenvolvimento de técnicas heurísticas e de otimização clássica para o problema de planejamento da expansão a longo prazo de sistemas de transmissão*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ilha Solteira, UNESP, São Paulo, Brasil, Novembro 2004.
- ROMERO, R.; GALLEGO, R.; MONTICELLI, A. Transmission system expansion planning by simulated annealing. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 11, n. 1, p. 364–369, fev. 1996.
- ROSEHART, W.; CANIZARES, C.; QUINTANA, V. Multiobjective optimal power flows to evaluate voltage security costs in power networks. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 18, n. 2, p. 578 – 587, maio 2003.
- SCHIOCHET, A. F. *Fluxo de potência ótimo multiobjetivo: abordagem utilizando uma estratégia de parametrização*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- SUN, D. et al. Optimal power flow by newton approach. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-103, n. 10, p. 2864–2880, Oct. 1984.
- TARANTO, G.; PINTO, L.; PEREIRA, M. Representation of facts devices in power system economic dispatch. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 2, p. 572 –576, may 1992.
- VOLPI, N.; ALMEIDA, K. Metodologia multicritério para alocação Ótima de facts numa rede de transmissão. *XI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, Belém, PA, 2009.
- WATANABE, E. H. et al. Tecnologia facts - tutorial. *Revista SBA Controle & Automação*, v. 9, n. 1, p. 39–55, 1998.
- YOKOYAMA, R. et al. Multiobjective optimal generation dispatch based on probability security criteria. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 1, p. 317 –324, 1988.
- ZHANG, X.-P. Advanced modeling of the multicontrol functional static synchronous series compensator (sssc) in newton power flow. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 18, n. 4, p. 1410–1416, Nov. 2003.
- ZHANG X. P. HANDSCHIN, E. Y. M. Modeling of the generalized unified power flow controller (gupfc) in a nonlinear interior point opf. *Power Engineering Review, IEEE*, v. 16, n. 3, p. 162–166, mar. 2001.

---

ZHANG, Y. et al. Power injection model of statcom with control and operating limit for power flow and voltage stability analysis. *Electric Power Systems Research*, v. 76, n. 12, p. 1003 – 1010, 2006.